
Reduzierung des Parameterraums für die Freigabe von hochautomatisierten Fahrfunktionen

Masterthesis Nr. 736/19

Bearbeiter: Nico Weber | 2071163

Betreuer: Christian Amersbach, M.Sc.; Björn Klamann, M.Sc.;
Dirk Frerichs, M.Sc.; Dr. Ulrich Eberle



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



FAHRZEUGTECHNIK
TU DARMSTADT

Nico Weber
Matrikelnummer: 2071163
Studiengang: Mechanical and Process Engineering (M.Sc.)

Masterthesis Nr. 736/19
Thema: Reduzierung des Parameterraums für die Freigabe von hochautomatisierten Fahrfunktionen

Eingereicht: 13. September 2019

Veröffentlicht unter CC BY-SA 4.0 International

Technische Universität Darmstadt
Fachgebiet Fahrzeugtechnik
Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner
Otto-Berndt-Straße 2
64287 Darmstadt

Erklärung

Erklärung zur Abschlussarbeit gemäß § 22 Abs. 7 und § 23 Abs. 7 APB TU Darmstadt

Hiermit versichere ich, Nico Weber, die vorliegende Master-Thesis gemäß § 22 Abs. 7 APB der TU Darmstadt ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Mir ist bekannt, dass im Falle eines Plagiats (§38 Abs.2 APB) ein Täuschungsversuch vorliegt, der dazu führt, dass die Arbeit mit 5,0 bewertet und damit ein Prüfungsversuch verbraucht wird. Abschlussarbeiten dürfen nur einmal wiederholt werden.

Bei der abgegebenen Thesis stimmen die schriftliche und die zur Archivierung eingereichte elektronische Fassung gemäß § 23 Abs. 7 APB überein.

Datum: 13. September 2019

Unterschrift:



Zusammenfassung

Die technische Entwicklung höher automatisierter Fahrfunktionen (SAE Level ≥ 3) ist so weit vorangeschritten, dass eine Markteinführung in greifbare Nähe gerückt zu sein scheint. Die größte Herausforderung liegt dabei im Sicherheitsnachweis für eine Serienfreigabe. Durch die veränderte Verantwortungsaufteilung zwischen Fahrzeugführendem und Fahrzeug im Falle höher automatisierten Fahrens wäre durch bestehende Ansätze des Sicherheitsnachweises wie beispielsweise dem statistischen, streckenbasierten Sicherheitsnachweis eine in der Praxis nicht zu bewältigende Anzahl an Testkilometern unter repräsentativen Bedingungen vor der Markteinführung notwendig. Aus diesem Grund werden neue Methoden des Sicherheitsnachweises für höhere automatisierte Fahrfunktionen entwickelt. Eine dieser Methoden ist der sogenannte szenarienbasierte Testansatz, welchem die Annahme zu Grunde liegt, dass ein Großteil der in der Realität vorkommenden Szenarien im Straßenverkehr unkritisch ist und ein Testen dieser deshalb keinen relevanten Erkenntnisgewinn mit sich bringt. Beim Testen der ausschließlich relevanten Szenarien ist deshalb eine Reduktion des Testaufwands zu erwarten, welcher jedoch weiterhin die in der Praxis bestehenden Kapazitäten übersteigt.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden aus den genannten Gründen Ansätze untersucht, welche das Potenzial aufweisen, den durch die Gesamtanzahl an Szenarien entstehenden Parameterraum, bei Anwendung des szenarienbasierten Testansatzes, weiter zu reduzieren. Die Grundlage bildet ein aus einer Verkehrs- und Fahrdynamiksimulation bestehendes, gekoppeltes Simulationsframework, welches in der Lage ist, manuell definierte, konkrete Szenarien bezüglich deren Kritikalität zu evaluieren. Das Framework wird im Rahmen dieser Arbeit um eine Methodik zur systematischen Ableitung logischer Szenarien und Definition konkreter Szenarien erweitert, welche zudem eine Quantifizierung des entstehenden Parameterraums sowie des Testumfangs ermöglicht. Außerdem wird der Einfluss verschiedener Durchdringungsgrade automatisierter Fahrfunktionen auf Wertebereiche und Auftretenswahrscheinlichkeiten der ein logisches Szenario beschreibenden Einflussparameter untersucht. Kern des Lösungsansatzes ist eine simulationsbasierte, statistische Auswertung relevanter Einflussparameter. Durch diese ist es möglich bei vorgegebener Instanzenanzahl des jeweiligen Einflussparameters wahrscheinlichkeitsbasierte Äquivalenzklassen und Diskretisierungsstufen abzuleiten. Die hierdurch definierbaren konkreten Szenarien sind zur Identifikation kritischer Szenarien nutzbar.

Die Anwendung der entwickelten Methodik zeigt, dass für die betrachteten funktionalen Szenarien *Einscherer* und *Stauauflösung* durch die Methode der funktionalen Dekomposition eine Reduktion des Parameterraums um den Faktor 45 bei 3-weiser und 30 bei 10-weiser Testabdeckung erzielt wird. Es wird eine systematische Ableitung logischer Szenarien und die Definition konkreter Szenarien ermöglicht, mit welcher eine weitere, nicht quantifizierbare Reduktion des Parameterraums einhergeht. Weiterhin wird das Potenzial der simulationsbasierten Ermittlung von Auftretenswahrscheinlichkeiten und Wertebereichen der Einflussparameter deutlich. Dies äußert sich für das funktionale Szenario *Einscherer* in Form eines Faktors der Zeitersparnis von 2000 im Vergleich zur Realfahrt. Überdies lassen sich signifikante Veränderungen der Lage- und Streuungsmaße exemplarisch betrachteter Einflussparameter in Abhängigkeit des Durchdringungsgrads automatisierter Fahrfunktionen innerhalb der Verkehrssimulation beobachten.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	I
Inhaltsverzeichnis.....	II
Formelzeichen und Indizes	IV
Abkürzungsverzeichnis.....	VI
Abbildungsverzeichnis.....	VIII
Tabellenverzeichnis	X
1 Einleitung	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Konkretisierung der Aufgabenstellung	5
1.3 Methodik des Vorgehens	6
2 Grundlagen.....	9
2.1 Terminologie.....	9
2.1.1 Szene, Situation und Szenario.....	9
2.1.2 Abstraktionsebenen von Szenarien	10
2.1.3 Schema zur Darstellung von Einflussparametern	11
2.2 Normative Grundlagen.....	13
2.2.1 Kategorisierung und Nomenklatur von Systemen der Automation der Fahraufgabe	13
2.2.2 ISO 26262 Road vehicles – Functional safety –	16
2.2.3 ISO/PAS 21448:2019 Road vehicles – Safety of the intended functionality –	17
2.2.4 Standardisierung der Szenarienbeschreibung für simulationsbasierte Anwendungen ..	18
2.3 Statistische Grundlagen.....	20
2.3.1 Grundbegriffe.....	20
2.3.2 Datendeskription	21
2.3.3 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion und Verteilungsfunktion	24
2.3.4 Nichtparametrische Dichteschätzung.....	25
3 Entwicklung einer Methodik zur systematischen Auswahl logischer Szenarien und Definition konkreter Szenarien.....	28
3.1 Anforderungen	28
3.1.1 Makroskopische Anforderungen.....	28
3.1.2 Prozessschrittspezifische Anforderungen	31
3.2 Stand der Technik	33
3.2.1 Definition relevanter funktionaler Szenarien	33
3.2.2 Auswahl potenzieller Einflussparameter	34
3.2.3 Analyse potenzieller Einflussparameter.....	38
3.2.4 Definition konkreter Szenarien	41
3.3 Bewertung und Ableitung der Methodik	50
4 Anwendung der Methodik im Simulationsframework.....	55
4.1 Definition funktionaler Szenarien	55

4.1.1	Funktionsspezifikation des Testobjekts	55
4.1.2	Szenarienkatalog PEGASUS und bestehende Veröffentlichungen	56
4.1.3	Ableitung exemplarischer funktionaler Szenarien	57
4.2	Auswahl potenzieller Einflussparameter	60
4.2.1	Ebenen 1 und 2: Straßenebene und Straßenausstattung.....	60
4.2.2	Ebene 4: Bewegliche Objekte	64
4.2.3	Ebene 5: Umweltbedingungen	66
4.2.4	Zusammenfassung.....	67
4.3	Analyse potenzieller Einflussparameter.....	69
4.3.1	Stochastische Verkehrssimulation für Stausituationen auf Autobahnen	70
4.3.2	Statistische Auswertung exemplarischer Einflussparameter	79
4.4	Definition konkreter Szenarien	88
4.4.1	Generierung von Diskretisierungsfunktionen	88
4.4.2	Funktionale Dekomposition.....	92
4.4.3	Deterministische Parametervariation	94
5	Diskussion der Ergebnisse	95
6	Fazit und Ausblick	101
Anhang	105
A.1	Analyse der Einflussparameter der stationären Elemente.....	105
A.2	Analyse der Einflussparameter der beweglichen Objekte	108
A.3	Übersichtsmatrix der funktionalen Dekomposition	113
A.4	Einflussmatrix	114
Literaturverzeichnis	115

Formelzeichen und Indizes

Lateinische Buchstaben:

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
a	./.	Merkmalsausprägung
c	./.	Intervallbreite
f	./.	Quantifizierungsfaktor
E	./.	Erwartungswert
G	%	Längsneigung
h	./.	Bandbreite
i	./.	Laufvariable
I	./.	Indikatorfunktion
j	./.	Laufvariable
J	Fz/h	Verkehrsfluss
K	./.	Kernfunktion
L	m	Länge des betrachteten Streckenabschnitts
n	./.	Häufigkeit einer Merkmalsausprägung
N	./.	Häufigkeit aller Merkmalsausprägungen
p	./.	Einflussparameter
P	./.	Bedingte Wahrscheinlichkeit
q	%	Querneigung
q	Fz/h	Alternative Bezeichnung Verkehrsfluss (Abbildung 4-5)
Q	./.	Zentraler Quartilsabstand
r	m	Radius
R	./.	Spannweite
\bar{R}	./.	Adjustiertes Bestimmtheitsmaß
s	./.	Standardabweichung
S	./.	Testumfang
v	./.	Instanzen
\bar{v}	km/h	Durchschnittsgeschwindigkeit
V	./.	Variationskoeffizient
x	./.	Merkmal
\bar{x}	./.	Arithmetisches Mittel
\tilde{x}	./.	Quantil
\hat{x}	./.	Modus

Griechische Buchstaben:

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
δ	./.	Klassenbreite
κ	1/m	Krümmung
μ	./.	Reibwert
ρ	Fz/km	Verkehrsdichte

Indizes:

Zeichen	Bezeichnung
α	Prozentsatz des Quantils
Durchgezogen	Durchgezogene Fahrstreifenmarkierung
EA	Einscherabstand
Epan	Epanechnikov
ez	Echtzeit
frei	Freifließender Verkehr
FTFI	Failure-triggering fault interaction number
fw	Fahrstreifenwechsel
gesamt	Gesamtheit aller Streckensegmente über alle Zeitschritte
HAF	Höher automatisierte Fahrfunktion
Hist	Histogramm
kum	Kumulativ
M	Modus
min	minimal
max	maximal
med	Median
p	Parallelisierung
part	Partikulärtest
real	Realität
segment	Streckensegment
sim	Simulation
sn	Betrachteter Streckenabschnitt
synch	Synchronisierter Verkehr
System	Systemebene
t	t-weise Testabdeckung
Unterbrochen	Unterbrochene Fahrstreifenmarkierung
zeit	Zeitdauer

Abkürzungsverzeichnis

ACC	Adaptive Geschwindigkeitsregelung
ADS	System zur Automation der Fahraufgabe
AS	Aktivsumme
ASAM	Association for Standardization of Automation and Measuring Systems
ASIL	Automotive Safety Integrity Level
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
CDF	Kumulative Dichtefunktion
DDT	Dynamische Fahraufgabe
Ego	Ego-Fahrzeug
EKA	Entwurfsklasse für Autobahnen
eFAST	Erweiterter Fourier-Amplituden-Sensitivitätstest
Fz	Fahrzeuge
FZD	Fahrzeugtechnik Darmstadt
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
FTFI	Failure-triggering fault interaction number
HAF	Höher automatisierte Fahrfunktion
ISO	International Organization for Standardization
LDW	Lane departure warning
MSE	Mittlere quadratische Abweichung
MISE	Integrierte mittlere quadratische Abweichung
NHTSA	National Highway Safety Administration
Obj 1	Führungsfahrzeug
Obj 2	Einscherendes Fahrzeug
OEDR	Umfelderfassung
ODD	Freigegebene Betriebsbedingungen des ADS
OuT	Testobjekt
PS	Passivsumme
QM	Qualitätsmanagement
RQ	Regelquerschnitt
RAA	Richtlinien für die Anlage von Autobahnen
RMS	Richtlinien für die Markierung von Straßen
SAE	Society of Automotive Engineers
SIL	Sicherheitsanforderungsstufen
SOTIF	Sicherheit der Sollfunktion
StVO	Straßenverkehrsordnung
SUMO	Simulation of Urban Mobility

TJC	Traffic-Jam-Chauffeur
VV	Validierung und Verifikation
XiL	X-in-the-Loop
XML	Extensible Markup Language

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Drei-Ebenen-Modell für zielgerichtete Tätigkeiten des Menschen nach Rasmussen und Drei-Ebenen-Hierarchie der Fahraufgabe nach Donges	3
Abbildung 1-2: Simulationsbasierte Entwicklungsmethodik zur Identifikation herausfordernder Szenarien	5
Abbildung 1-3: Die verschiedenen Abstraktionsebenen von Szenarien im V-Modell-basierten Entwicklungsprozess; Abkürzung: GuR – Gefährdungsanalyse und Risikobewertung	7
Abbildung 1-4: Spezifiziertes Vorgehen zur Demonstration der Anwendbarkeit der entwickelten Methodik	8
Abbildung 2-1 : Abstraktionsebenen von Szenarien mit Zuordnung zu Anforderungen jeweiliger Phase der ISO 26262	10
Abbildung 2-2: Schema zur Darstellung von Einflussparametern nach Schuldt	12
Abbildung 2-3: Kategorisierung von ADS nach SAE J3016 und analoge Einstufung durch die BASt	16
Abbildung 2-4: Visualisierung der Lage und Streuung eines Datensatzes als Box-Whisker-Plot	24
Abbildung 2-5: Riemann-Dichten und zugehörige Verteilungsfunktionen für verschiedene Gammaverteilungen	25
Abbildung 2-6: Kerndichteschätzung durchschnittlicher Regenmengen in US-Bundesstaaten (Epanechnikov-Kern)	27
Abbildung 3-1: 6-Ebenen-Modell zur Strukturierung von Szenarien nach Bagschik et al. basierend auf Schuldt	35
Abbildung 3-2: Kerndichteschätzung Kurvenkrümmung (links) & Auswertung Kurvenradien aus OpenStreetMap (rechts)	40
Abbildung 3-3: Dekompositionsebenen	46
Abbildung 3-4: Reduktion des Testumfangs durch partikuläres Testen	48
Abbildung 3-5: Gesamtmethodik mit für die Anwendung ausgewählten Informationsquellen und Methoden	54
Abbildung 4-1: Visualisierung des funktionalen Szenarios <i>Einscherer</i>	58
Abbildung 4-2: Visualisierung des funktionalen Szenarios <i>Stauauflösung</i>	59
Abbildung 4-3: Veranschaulichung der Querneigungsdefinition nach RAA (positive Querneigung bei Fahrtrichtung in Zeichenebene)	62
Abbildung 4-4: Für die Verkehrssimulation verfügbares Straßennetzwerk (Ausschnitt des Verkehrskreuzes Frankfurt)	70
Abbildung 4-5: Die verschiedenen Zustände des Verkehrs (links) sowie Aufzeichnung eines Staus (rechts)	76
Abbildung 4-6: Aus Simulation erhaltene Verkehrszustände (Funktionales Szenario <i>Einscherer</i>) ..	78
Abbildung 4-7: Aus Simulation erhaltene Verkehrszustände (Funktionales Szenario <i>Stauauflösung</i>)	79
Abbildung 4-8: Statistische Auswertung der Fahrstreifenbreite rechts	81
Abbildung 4-9: Statistische Auswertung Einscherabstand (Funktionales Szenario <i>Einscherer</i>)	82
Abbildung 4-10: Statistische Auswertung Einscherdauer (Funktionales Szenario <i>Einscherer</i>)	82
Abbildung 4-11: Statistische Auswertung Initialdistanz Ego-Obj 1 (Funktionales Szenario <i>Stauauflösung</i>)	83
Abbildung 4-12: Einfluss des Durchdringungsgrads von HAF auf den Einscherabstand	85
Abbildung 4-13: Anzahl erfolgreicher Fahrstreifenwechsel in Abhängigkeit des Durchdringungsgrads	86
Abbildung 4-14: Einfluss Durchdringungsgrad von HAF auf Initialgeschwindigkeit Einscherer	86
Abbildung 4-15: Kerndichteschätzung Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des Einscherabstands ..	89

Abbildung 4-16: Kerndichteschätzung der Quantilfunktion mit zugehörigem Fourierpolynom	90
Abbildung 4-17: Wahrscheinlichkeitsäquidistante Diskretisierung des Einscherabstands	91
Abbildung 4-18: Reduktionspotenzial des Parameterraums durch funktionale Dekomposition	93
Abbildung 4-19: Implementierung einer deterministischen Parametervariation	94
Abbildung 5-1: Ergebnisinterpretation der Einflussmatrix	99
Abbildung A-1: Statistische Auswertung - Fahrstreifenbreite links	105
Abbildung A-2: Statistische Auswertung – Fahrstreifenbreite Mitte	105
Abbildung A-3: Statistische Auswertung – Fahrstreifenmarkierungstyp rechte Seite des rechten Fahrstreifens	106
Abbildung A-4: Statistische Auswertung – Fahrstreifenmarkierungsbreite rechte Seite des rechten Fahrstreifens	106
Abbildung A-5: Statistische Auswertung – Markierungselementlücke rechte Seite des rechten Fahrstreifens	107
Abbildung A-6: Statistische Auswertung – Längsneigung der Fahrbahn	107
Abbildung A-7: Statistische Auswertung – Querneigung der Fahrbahn	108
Abbildung A-8: Statistische Auswertung - Initialdistanz Ego-Obj 1 (Funktionales Szenario <i>Einscherer</i>)	108
Abbildung A-9: Statistische Auswertung – Initialgeschwindigkeit Ego + Obj 1 (Funktionales Szenario <i>Einscherer</i>)	109
Abbildung A-10: Statistische Auswertung – Initialgeschwindigkeit Einscherer (Funktionales Szenario <i>Einscherer</i>)	109
Abbildung A-11: Statistische Auswertung – Finalgeschwindigkeit Einscherer (Funktionales Szenario <i>Einscherer</i>)	110
Abbildung A-12: Statistische Auswertung – Initialgeschwindigkeit Ego + Obj 1 (Funktionales Szenario <i>Stauauflösung</i>)	110
Abbildung A-13: Statistische Auswertung – Beschleunigung Ego + Obj 1 (Funktionales Szenario <i>Stauauflösung</i>)	111
Abbildung A-14: Statistische Auswertung - Fahrzeugtyp Einscherer (Funktionales Szenario <i>Einscherer</i>)	111
Abbildung A-15: Statistische Auswertung - Fahrzeugtyp Führungsfahrzeug (Funktionales Szenario <i>Einscherer</i>)	112
Abbildung A-16: Statistische Auswertung - Fahrzeugtyp Führungsfahrzeug (Funktionales Szenario <i>Stauauflösung</i>)	112

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Applizierbare Lagemaße.....	22
Tabelle 2-2: Applizierbare Streuungsmaße.....	22
Tabelle 3-1: Makroskopische Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik	29
Tabelle 3-2 : Prozessschrittspezifische Anforderungen an Methodik nach Schuldt.....	31
Tabelle 3-3: Anforderungsabhängige Bedeutungen der Bewertungssymbole.....	50
Tabelle 3-4 : Bewertung der Informationsquellen zur Auswahl von Einflussparametern.....	51
Tabelle 3-5: Bewertung Informationsquellen & Methoden zur Analyse von Einflussparametern....	52
Tabelle 3-6: Bewertung der Informationsquellen zur Definition konkreter Szenarien	53
Tabelle 4-1: Szenarienrelevante Informationen der Funktionsspezifikation	55
Tabelle 4-2: Relevante funktionale Szenarien für den Anwendungsfall Traffic-Jam-Chauffeur	58
Tabelle 4-3: Potenzielle Einflussparameter der beweglichen Objekte für das funktionale Szenario <i>Einscherer</i>	65
Tabelle 4-4: Potenzielle Einflussparameter der beweglichen Objekte für das funktionale Szenario <i>Stauauflösung</i>	65
Tabelle 4-5: Ausgewählte potenzielle Einflussparameter für betrachtete funktionalen Szenarien ...	67
Tabelle 4-6: Fahrzeugtypspezifische Parametrierung der implementierten Modelle in SUMO	72
Tabelle 4-7: Zusammenfassung der Implementierung & Parametrierung.....	74
Tabelle 4-8: Klassenbreiten der Diskretisierung des Einscherabstands.....	91
Tabelle A-1: Übersichtsmatrix funktionale Dekomposition & exemplarischer Parameterraum	113
Tabelle A-2: Einflussmatrix des funktionalen Szenarios <i>Einscherer</i>	114

1 Einleitung

1.1 Motivation

Der in den vergangenen Jahren noch vornehmlich visionäre Charakter des höher automatisierten Fahrens, bei welchem die kontinuierliche Übernahme der Fahraufgabe durch den Fahrzeugführenden keine Notwendigkeit mehr darstellt, scheint durch die Realisierung verschiedener Systeme der Teilautomatisierung der Fahraufgabe bereits in greifbare Nähe gerückt. Mit dem Einzug zunehmender Fahrzeugsensorik, einer Erhöhung der Anzahl elektromechanischer Aktoren sowie der Steigerung der Rechenleistung können dem Fahrzeugführenden bereits heute Assistenzsysteme bereitgestellt werden, die das Ziel verfolgen, für eine erhöhte Sicherheit sowie einen erhöhten Komfort während der Fahrt im Straßenverkehr zu sorgen.¹ Hierzu wurde eine „Vision Zero“ für die Straßenverkehrssicherheit im Jahr 2011 in den Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum durch die Europäische Kommission aufgenommen. Die Europäische Union strebt eine Halbierung der Anzahl von Unfalltoten im Straßenverkehr bis 2020 und eine Senkung dieser bis 2050 auf nahe Null an. In diesem Kontext werden Fahrerassistenzsysteme als einer der Bausteine zum Erreichen dieser Ziele genannt.² Zu beachten ist dabei die Tatsache, dass die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen in Wechselwirkung mit sowohl anderen Technologieentwicklungen als auch den Entwicklungen der Gesellschaft steht.³ So bietet die Einführung höher automatisierter Fahrzeuge neben Potenzialen in Hinblick auf den Verkehrsfluss sowie neue Nutzungskonzepte darüber hinaus bislang nicht im Fokus der Forschungsgemeinschaft stehende Potenziale. Beispiele hierfür sind eine weitreichende Umgestaltung des Verkehrssystems bis hin zu Implikationen im Kontext der physischen Gestaltung städtischer Räume.^{4,5}

Der Unterschied zwischen bereits für die Serienproduktion freigegebenen Fahrerassistenzsystemen und den aktuell in der Entwicklung befindlichen Systemen lässt sich durch die Verantwortungsteilung zwischen Fahrzeugführendem und Fahrzeug aufzeigen. Mit dem Ziel einer einheitlichen Terminologie wurde durch die Norm SAE⁶ J3016 im Jahr 2014 eine Richtlinie definiert, innerhalb welcher eine Klassifizierung automatisierter Fahrfunktionen in sechs Stufen (SAE Level 0-5) erfolgt. Während bei Systemen bis zur Teilautomatisierung (SAE Level ≤ 2) der Fahrzeugführende für die Überwachung der Umwelt erforderlich ist, übernimmt der Fahrroboter diese Aufgabe bei höher automatisierten Systemen (SAE Level ≥ 3), abhängig von dessen Funktionsspezifikation, innerhalb de-

¹ Pfeffer, P.: Ausblick - Zukunft der Lenkung im Automobil (2013), S. 473.

² EU-Kommission: Fahrplan europäischer Verkehrsraum (2011), S. 12 ff.

³ Winner, H.: Quo vadis, FAS? (2015), S. 1168.

⁴ Maurer, M.: Einleitung (2015), S. 5.

⁵ Heinrichs, D.: Autonomes Fahren und Stadtstruktur (2015), S. 220.

⁶ Society of Automotive Engineers.

finierter Funktionsgrenzen. Bei Erreichen der Systemgrenzen des Assistenzsystems wird vom Fahrzeug eine Übernahmeaufforderung an den Fahrzeugführenden signalisiert, der dieser in einer vorgegebenen Zeitspanne nachzukommen hat, bevor sich das Assistenzsystem abschaltet.⁷

Anhand Abbildung 1-1 lässt sich aufzeigen, weshalb die genannten Unterschiede dazu führen, dass sich der Aufwand zur Freigabe höher automatisierter Fahrfunktionen (HAF) erhöht. Die Abbildung entspricht einer kombinierten Darstellung des Drei-Ebenen-Modells für zielgerichtete Tätigkeiten des Menschen nach Rasmussen und der Drei-Ebenen-Hierarchie der Fahraufgabe nach Donges.^{8,9} Für bisher in der Serie vorhandene Automatisierungsstufen steht das Fahrzeug und speziell dessen Kontrollierbarkeit¹⁰ durch den Fahrzeugführenden im Fokus, was einer Absicherung des dunkelgrau hinterlegten Bereichs entspricht. Dabei schneidet der dunkelgraue Bereich die durch den Fahrzeugführenden übernommenen Aufgaben nur leicht, da das Fahrzeug und dessen Verhalten bezüglich der Längs- und Querdynamik getestet werden, jedoch nicht das Verhalten oder die Fähigkeiten des zukünftigen Fahrzeugführendens. Getestet werden lediglich die Möglichkeiten für den Testfahrer das Fahrzeug mit Eingriffen in Längs- und Querdynamik im Testfall zu beherrschen. Die für eine Absicherung aktueller Systeme nachzuweisende Sicherheit ergibt sich also aus einer Kombination von Fahrzeugführendem und Fahrzeug, wobei für die Freigabe des Fahrzeugs ausschließlich dieses im Fokus steht und die Zuverlässigkeit des Fahrers vorausgesetzt wird. Es ist anzumerken, dass der Begriff der Sicherheit im Kontext der Absicherung automatisierter Fahrfunktionen immer im Zusammenhang mit einem tolerierbaren Restrisiko zu verstehen ist, dessen Bewertung wiederum mit Unsicherheiten verbunden ist.^{10,11}

Mit der Substitution der Fähigkeiten des Fahrzeugführendens durch den Fahrroboter innerhalb definierter Funktionsgrenzen entfällt der Test der Kontrollierbarkeit durch den Fahrzeugführenden für diese Fahrzustände. Dies führt zu einem Test der Funktionalität eines technischen Systems. Für automatisierte Fahrzustände ist die Sicherheit des technischen Systems Fahrroboter und Fahrzeug, welches durch den hellgrauen Bereich innerhalb Abbildung 1-1 repräsentiert wird, nachzuweisen. Dies führt zur Herausforderung der Absicherung des technischen Systems bei gesteigerter Aufgabenquantität und -qualität.^{12a}

⁷ SAE International: SAE J3016 (2018), S. 19.

⁸ Rasmussen, J.: Skills, Rules and Knowledge (1983), S. 257–266.

⁹ Donges, E.: Fahrerverhaltensmodelle (2015), S. 18–20.

¹⁰ ISO: 26262 - Road vehicles - Functional safety - (2011), S. 5 ff.

¹¹ Junietz, P. et al.: Approaches to Address Safety Validation (2018), S. 493 ff.

¹² Wachenfeld, W.; Winner, H.: Die Freigabe des autonomen Fahrens (2015). a: S. 449; b: S. 450; c: S. 440; d: S. 446.

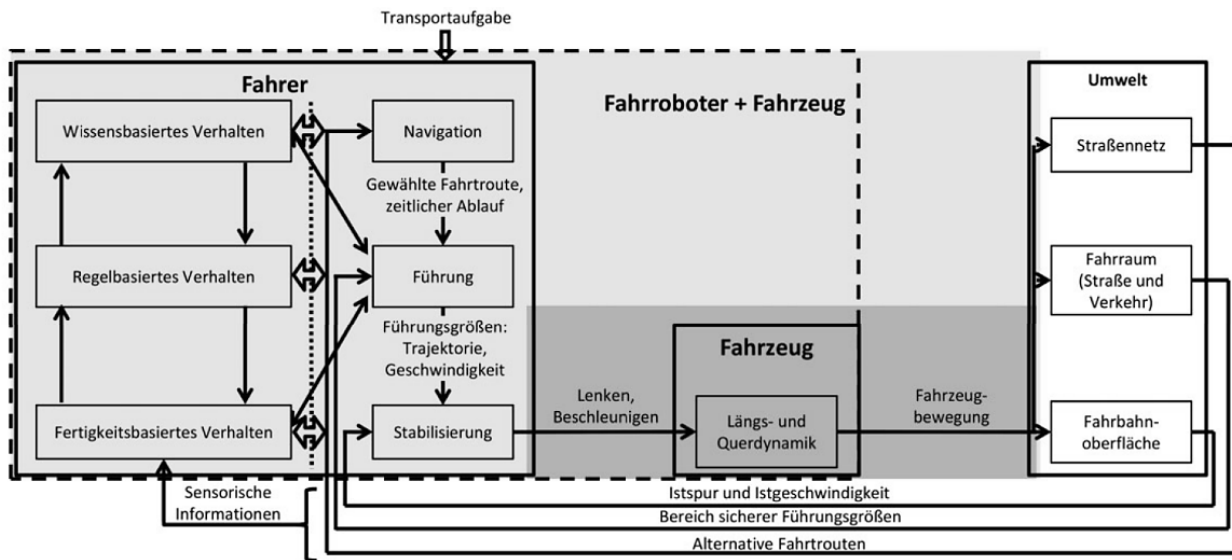


Abbildung 1-1: Drei-Ebenen-Modell für zielgerichtete Tätigkeiten des Menschen nach Rasmussen und Drei-Ebenen-Hierarchie der Fahraufgabe nach Donges^{12b}

Die Sicherheit des Menschen im öffentlichen Straßenverkehr stellt eine der Hauptmotivationen für den Einsatz höher automatisierter Fahrzeuge dar, denn die Mehrheit der aktuellen Unfälle wird durch den menschlichen Fahrer verursacht.^{12c,13} Dieser Umstand führt dazu das Sicherheitsziel höher automatisierter Fahrzeuge am Status quo der Straßenverkehrssicherheit zu bemessen. Während die Absicherung basierend auf Realfahrten im Straßenverkehr bereits für aktuelle Fahrerassistenzsysteme eine ökonomische Herausforderung darstellt, führt die Betrachtung einer streckenbasierten, statistischen Absicherung höher automatisierter Fahrfunktionen zu einer de facto Nichtumsetzbarkeit in der Praxis vor Markteinführung.^{12d} So wären für den statistischen Sicherheitsnachweis eines Autobahnautomaten, unter der Annahme, dass die automatisierte Fahrfunktion doppelt so sicher – bezogen auf die Anzahl tödlicher Unfälle – wie ein menschlicher Fahrzeugführender ist, circa sechs Milliarden Testkilometer¹⁴ unter repräsentativen Bedingungen im Realverkehr nötig. Die Berechnungen basieren auf der Unfallstatistik des statistischen Bundesamts aus dem Jahr 2013 sowie einer Erfolgswahrscheinlichkeit des Tests von 50 % und einer Irrtumswahrscheinlichkeit von fünf Prozent.¹⁵ Um a priori eine Aussage über das Erreichen des Sicherheitsziels treffen zu können, müsste eine allgemeine Metrik existieren, welche in der Lage ist die Perzeptions-, Kognitions- und Aktionsleistungsfähigkeit zwischen Mensch und Fahrroboter zu vergleichen. Eine solche, bisher nicht bekannte Metrik würde es erlauben, in Übereinstimmung mit der ISO 26262¹⁶ analog zur ASIL¹⁷-Einstufung, welche ebenfalls die Kontrollierbarkeit durch den Fahrzeugführenden heranzieht, eine definierte Fähigkeitsklasse des Fahrroboters festzulegen.¹⁵

¹³ Pfeffer, P.: Ausblick - Zukunft der Lenkung im Automobil (2013), S. 473.

¹⁴ Amersbach, C.; Winner, H.: Functional decomposition (2019), 52.

¹⁵ Winner, H.: Quo vadis, FAS? (2015), S. 1174 ff.

¹⁶ ISO: 26262 - Road vehicles - Functional safety - (2011), S. 6–12.

¹⁷ Automotive Safety Integrity Level.

Da die Absicherung höher automatisierter Fahrfunktionen durch in der Industrie bestehende Ansätze wie die Felderprobung aufgrund der erforderlichen Anzahl an Testkilometern nicht umsetzbar ist, sind neuartige Methoden Gegenstand aktueller Forschung.¹⁸ Im Projekt PEGASUS¹⁹ wird ein szenarienbasierter Testansatz für den Sicherheitsnachweis des sogenannten Autobahn-Chauffeurs verfolgt.²⁰ Charakteristikum des Ansatzes ist die Annahme, dass ein Großteil der Fahrstrecken auf Autobahnen ohne Auftreten kritischer²¹ Szenarien²² zurückgelegt werden kann, während diese im Realverkehr selten auftreten und zufällig verteilt sind. Ein Testen der unkritischen Szenarien birgt dabei keinen relevanten Erkenntnisgewinn. Dies führt zu der Annahme, dass durch Identifikation reproduzierbarer, kritischer Szenarien die Möglichkeit besteht, den benötigten Testaufwand signifikant zu reduzieren.²³ Szenarien lassen sich nach Bagschik et al.²⁴ in drei unterschiedliche Abstraktionsebenen aufgliedern. Die sprachlich gefassten, funktionalen Szenarien repräsentieren die höchste Abstraktionsebene bei geringster Szenarienzahl. Der ein logisches Szenario beschreibende Parameterraum setzt sich aus Anzahl, Instanzen und Wertebereich der relevanten Einflussparameter zusammen. Die Überführung der funktionalen Szenarien in logische Szenarien geht mit einer Absenkung der Abstraktionsebene sowie einer Erhöhung der möglichen Szenarienzahl einher. Abhängig von der Konstitution des Parameterraums des logischen Szenarios lassen sich unterschiedlich viele konkrete Szenarien ableiten, was auch bei Einführung eines szenarienbasierten Ansatzes zu der sogenannten Parameterraumexplosion führen kann.²³ Die systematische Auswahl logischer Szenarien sowie deren Überführung in eine in der Praxis zu bewältigende Anzahl konkreter Szenarien stellt eine offene Forschungsfrage dar^{23,25,26,27} und wird in dieser Arbeit thematisiert.

Simulative Ansätze besitzen das Potenzial einen Großteil der Anforderungen an ein Testkonzept zur Absicherung höher automatisierter Fahrfunktionen zu erfüllen.^{28a} Die Etablierung des Einsatzes von Simulationsprogrammen im Entwicklungsprozess im Kontext der Automobilindustrie lässt sich wirtschaftlich sowie technisch begründen.^{29,30,31} Dennoch ist zu erwarten, dass durch Verlagerung von Testfällen in X-in-the-Loop-Methoden (XiL-Methoden) nicht vollständig auf Realfahrten verzichtet werden kann, da ein Nachweis der Validität dieser Methoden erforderlich ist.^{28b}

¹⁸ Amersbach, C.; Winner, H.: Required and Feasible Test Coverage (2019), S. 1.

¹⁹ Projekt zur Etablierung von generell akzeptierten Gütekriterien, Werkzeugen und Methoden sowie Szenarien und Situationen zur Freigabe hochautomatisierter Fahrfunktionen.

²⁰ Junietz, P. et al.: Approaches to Address Safety Validation (2018), S. 494.

²¹ Verwendung der Definition von Kritikalität nach Junietz, P. et al.: Metrik zur Bewertung der Kritikalität, S. 152.

²² Vgl. Kap. 2.1.1 (Szene, Situation und Szenario).

²³ Amersbach, C.; Winner, H.: Funktionale Dekomposition (2018), S. 2 ff.

²⁴ Bagschik, G. et al.: Szenarien für automatisierte Fahrzeuge (2017), S. 7 ff.

²⁵ Schuldt, F.: Diss., Methodischer Test automatisierter Fahrfunktionen (2017), S. 85 ff.

²⁶ Junietz, P. et al.: Approaches to Address Safety Validation (2018), S. 494.

²⁷ Hallerbach, S. et al.: Simulation-Based Identification of Critical Scenarios (2018), S. 3.

²⁸ Wachenfeld, W.; Winner, H.: Die Freigabe des autonomen Fahrens (2015). a: S. 447-448; b: S. 463.

²⁹ Schramm, D. et al.: Modellbildung von Kraftfahrzeugen (2018), S. 1 ff.

³⁰ Seiffert, U.; Rainer, G.: Virtuelle Produktentstehung im Kfz (2008), S. 1 ff.

³¹ Vgl. Kap. 3.2.3.2 (Statistische Auswertungen).

1.2 Konkretisierung der Aufgabenstellung

Am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt (FZD) wird in Zusammenarbeit mit der Opel Automobile GmbH am Thema der Freigabe von höher automatisierten Fahrfunktionen geforscht. Im Rahmen dieser Arbeit werden dazu Ansätze zur Optimierung des Parameterraums für die Freigabe von höher automatisierten Fahrfunktionen untersucht.

Die Grundlage dieser Arbeit bildet die von Hallerbach et al.^{32a} entwickelte Methode zur automatisierten Identifikation kritischer Szenarien, welche in Abbildung 1-2 schematisch dargestellt ist. Innerhalb dieser wird SUMO, ein Simulationsprogramm für die dynamische Verkehrssimulation über das bei Opel intern entwickelte Simulationsframework AXIOM^{33,34} mit einer Fahrdynamiksimulation in IPG CarMaker gekoppelt. Der virtuelle Prototyp der zu untersuchenden Fahrfunktion, das sogenannte Testobjekt, wird in AXIOM, welches auf MATLAB/Simulink aufbaut, simuliert. Mit Hilfe der Koppelung von Verkehrs- und Fahrdynamiksimulation werden auf Basis von objektiven Metriken herausfordernde Verkehrsszenarien identifiziert, welche zur weiteren Analyse der Seriensoftware herangezogen werden.

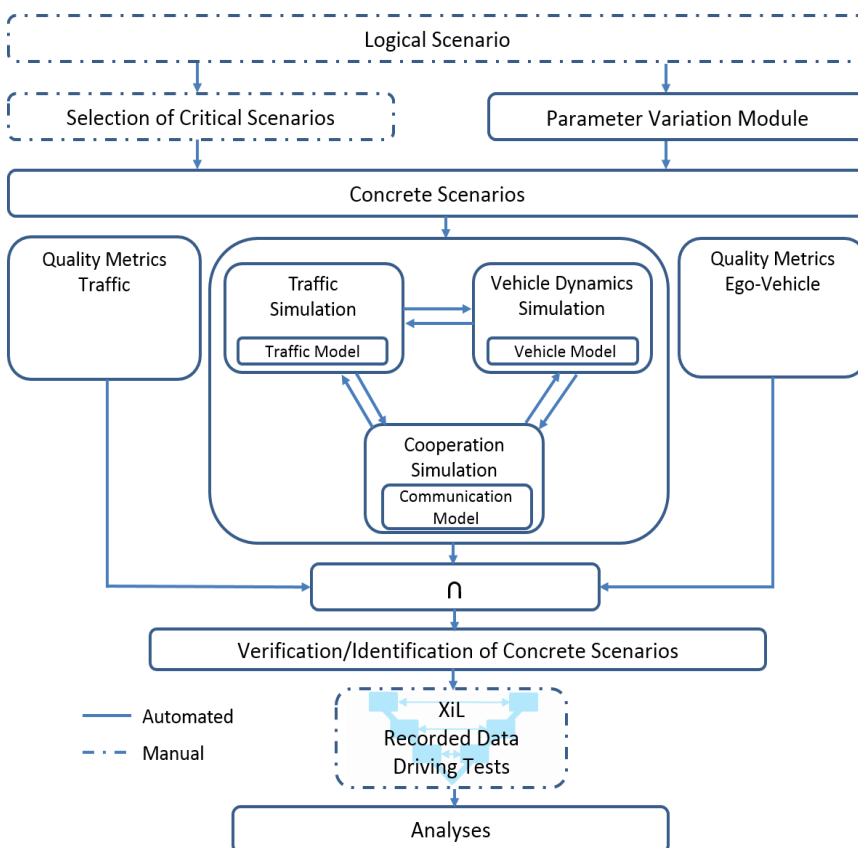


Abbildung 1-2: Simulationsbasierte Entwicklungsmethodik zur Identifikation herausfordernder Szenarien^{32b}

³² Hallerbach, S. et al.: Simulation-Based Identification of Critical Scenarios (2018). a: - ; b: S. 2.

³³ Automotive **X** in the Loop Object-oriented Model framework.

³⁴ Frerichs, D.; Borsdorf, M.: Quality for Vehicle System Simulation (2018), S. 4 ff.

Die in Abbildung 1-2 dargestellte Methode ist für ein manuell vordefiniertes, konkretes Szenario ausführbar. Zur Industrialisierung der Methode besteht die Aufgabe der vorliegenden Arbeit in einer Erweiterung dieser innerhalb der Prozessschritte der Auswahl logischer Szenarien und automatisierten Überführung dieser in konkrete Szenarien als Eingang der gekoppelten Simulation. Hierzu ist eine Methode zur systematischen Auswahl logischer Szenarien und Überführung dieser in konkrete Szenarien zu entwickeln. Von der Methode wird gefordert eine Bestimmung des zugehörigen Parameterraums sowie des nötigen Testumfangs³⁵ zu ermöglichen. Um der Problematik der sogenannten Parameterraumexplosion entgegenzuwirken, ist dazu die von Amersbach und Winner³⁶ vorgeschlagene Methode der funktionalen Dekomposition zur Reduktion des Parameterraums anzuwenden und die einhergehende Reduktion mit objektiven Kenngrößen zu bestätigen. Zudem ist die Anwendbarkeit der Methode exemplarisch im vorhandenen Simulationsframework zu demonstrieren.

1.3 Methodik des Vorgehens

Die im Rahmen dieser Arbeit gewählte Methodik des Vorgehens basiert auf dem V-Modell, welches ursprünglich als Entwicklungsstandard für IT-Systeme des Bundes geschaffen wurde.³⁷ Zielsetzung des Vorgehensmodells war dabei die Minderung eines Fehlschlags sowie die Steigerung der Produktqualität durch den Entwicklungsprozess.³⁸ Das V-Modell, das sich für eine top-down motivierte und strukturierte Entwicklung komplexer Systeme eignet, ist mittlerweile auch in anderen Domänen etabliert.³⁹ Der Ablauf innerhalb der ISO 26262⁴⁰, welche als Stand der Technik für den Nachweis der funktionalen Sicherheit von Pkw anzusehen ist, basiert ebenfalls auf dem V-Modell. Da Fahrerassistenzfunktionen sowie höher automatisierte Fahrfunktionen funktional weitestgehend in Software abgebildet werden, bietet sich das V-Modell als Prozess zu deren Entwicklung ebenfalls an.⁴¹ Im Bereich der Entwicklung mechatronischer Systeme deckt der obere Bereich des linken Astes im V-Modell die Systemmodellierung ab. Die disziplinspezifische Entwicklung erstreckt sich vom unteren Bereich des linken Astes bis in den unteren Bereich des rechten Astes. Der sich anschließende Bereich der Systemintegration beinhaltet alle weiteren Arbeitsschritte. Ein Charakteristikum des V-Modells ist, dass jede der drei Ebenen – System, Partialsysteme und disziplinspezifische Komponenten – einen zum Modellierungs- beziehungsweise Entwicklungsbereich korrespondierenden Verifikations- und Validationsbereich aufweist.⁴²

Die Notwendigkeit verschiedener Abstraktionsebenen von Szenarien ist das Ergebnis einer Analyse der Vereinbarkeit der ISO 26262 mit dem szenarienbasierten Testansatz. Die verschiedenen Abstrak-

³⁵ Amersbach, C.; Winner, H.: Required and Feasible Test Coverage (2019).

³⁶ Amersbach, C.; Winner, H.: Functional Decomposition (2017).

³⁷ Bröhl, A.-P.: Das V-Modell (1995).

³⁸ Höhn, R.; Höppner, S.: Das V-Modell XT (2008), S. 2.

³⁹ Lotz, F.: Diss., Referenzarchitektur für die automatisierte Fahrzeugführung (2017), S. 6 ff.

⁴⁰ ISO: 26262 - Road vehicles - Functional safety - (2011), S. 5 ff.

⁴¹ Hakuli, S.; Krug, M.: Virtuelle Integration (2015), S. 128 ff.

⁴² VDI: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme (2004), S. 29 ff.

tionsebenen lassen sich, wie in Abbildung 1-3 ersichtlich, in den V-Modell-basierten Entwicklungsprozess einordnen.^{43a} Diese Abstraktionsebenen korrespondieren mit der Aufgabenstellung, da innerhalb der vorliegenden Arbeit eine systematische Auswahl logischer Szenarien auf Basis funktionaler Szenarien zu erfolgen hat. Unter Anwendung geeigneter Reduktionsstrategien des Parameterraums hat anschließend eine Transformation logischer in konkrete Szenarien zu erfolgen, welche den Eingang in das vorhandene Simulationsframework bilden.

Das V-Modell definiert im Rahmen dieser Arbeit das Vorgehensmodell bei der nachfolgenden Entwicklung der Methodik zur systematischen Auswahl logischer Szenarien und Überführung dieser in konkrete Szenarien. Dies lässt sich dadurch begründen, dass der szenarienbasierte Testansatz unter Beachtung der verschiedenen Abstraktionsebenen von Szenarien mit dem V-Modell-basierten Entwicklungsprozess vereinbar ist. Die Auswahl des V-Modells wird zusätzlich dadurch unterstützt, dass dieses innerhalb der ISO26262 ebenfalls den Entwicklungsprozess definiert. Darüber hinaus zielt das gekoppelte Simulationsframework auf eine durchgängige Anwendbarkeit innerhalb der verschiedenen XiL-Methoden ab, welche bei Anwendung eines V-Modell-basierten Entwicklungsprozesses möglich ist.⁴⁴

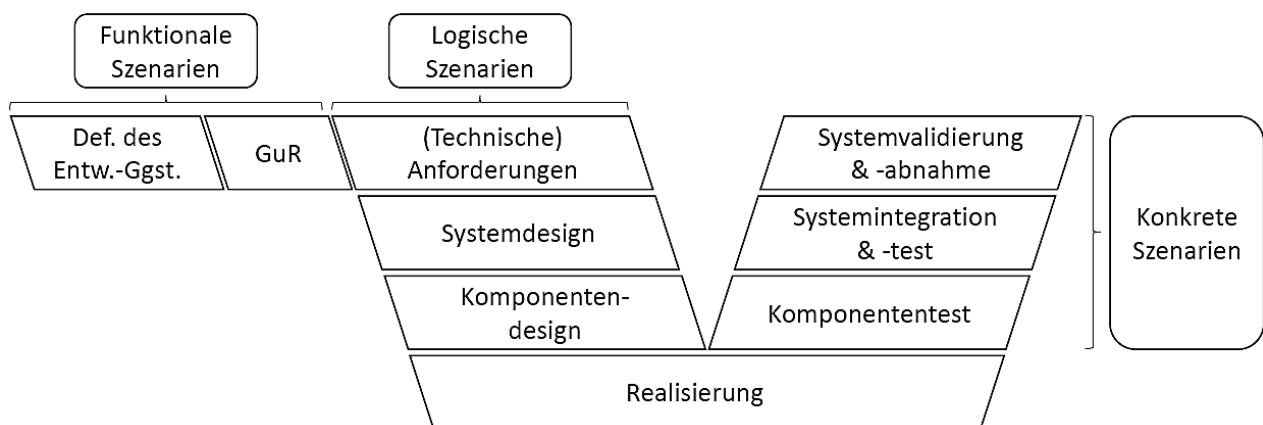


Abbildung 1-3: Die verschiedenen Abstraktionsebenen von Szenarien im V-Modell-basierten Entwicklungsprozess; Abkürzung: GuR – Gefährdungsanalyse und Risikobewertung^{43b}

In Abbildung 1-4 ist das spezifizierte Vorgehen zur Demonstration der Anwendbarkeit der in Kapitel 3 entwickelten Methodik dargestellt. Ausgangspunkt des Vorgehens bilden die ausgewählten potenziellen Einflussparameter der im Rahmen dieser Arbeit betrachteten funktionalen Szenarien. Den ersten Prozessschritt des spezifizierten Vorgehens bildet die Ermittlung von Auftretenswahrscheinlichkeiten und Wertebereichen der ausgewählten Einflussparameter in einer stochastischen Verkehrssimulation für Stausituationen auf Autobahnen unter Nutzung des Programms Simulation of Urban Mobility (SUMO). Die durch die Verkehrssimulation erzeugten Daten bilden die Grundlage der statistischen Auswertung unter Nutzung von MATLAB. Diese Auswertung ermöglicht die Generierung

⁴³ Bagschik, G. et al.: Szenarien für automatisierte Fahrzeuge (2017). a: S. 133-134; b: S. 134.

⁴⁴ Garousi, V. et al.: Testing embedded software (2018), S. 20 f.

von Diskretisierungsfunktionen der ausgewählten Einflussparameter, womit eine Reduktion des Parameterraums einhergeht. Eine weitere Reduktion wird durch die Anwendung der Methode der funktionalen Dekomposition erzielt. Anschließend erfolgt die Implementierung einer deterministischen Parametervariation in MATLAB. Die auf diese Weise entstehenden Kombinationen von Parameterwerten bilden als konkrete Szenarien die Grundlage für die gekoppelte Simulation in AXIOM zur Identifikation kritischer Szenarien.

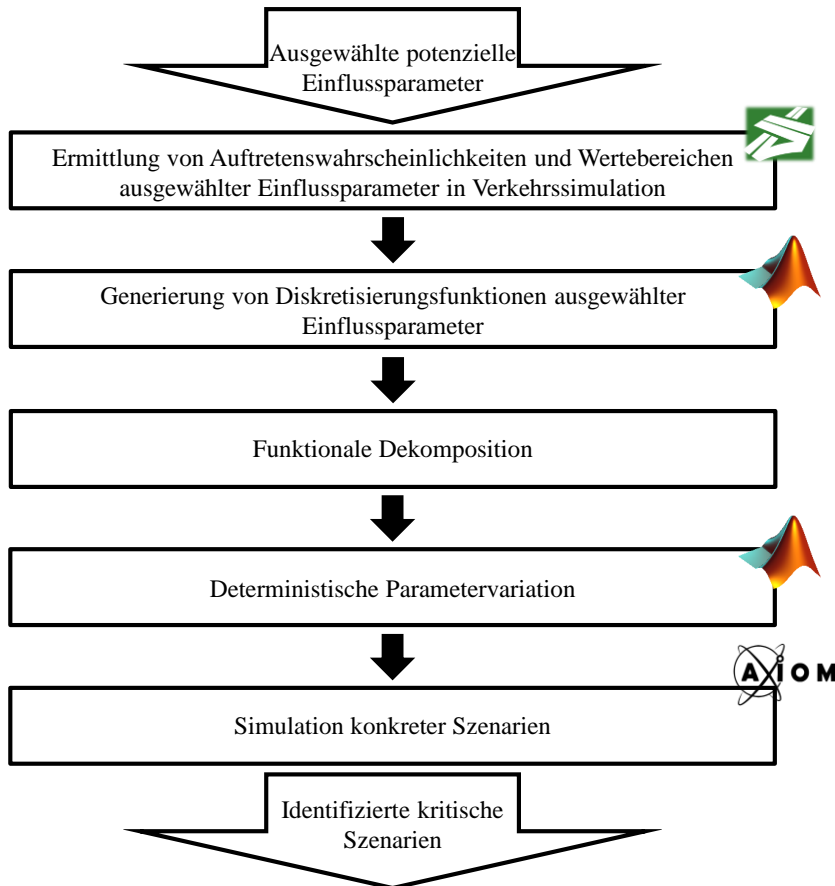


Abbildung 1-4: Spezifiziertes Vorgehen zur Demonstration der Anwendbarkeit der entwickelten Methodik

Die vorliegende Arbeit ist wie folgt gegliedert. In Kapitel 2 werden zunächst die Grundlagen zur Kategorisierung und Nomenklatur von Systemen der Automation der Fahraufgabe erläutert, bevor eine Einführung in die für die Arbeit relevante Terminologie erfolgt. Den Abschluss des zweiten Kapitels bilden die zum nachfolgenden Verständnis notwendigen statistischen Grundlagen. Das dritte Kapitel beinhaltet die Entwicklung der Methodik zur systematischen Auswahl logischer Szenarien und Definition konkreter Szenarien. Die Anwendbarkeit der entwickelten Methodik wird in Kapitel 4 evaluiert. Innerhalb dieses Kapitels werden weitere Aspekte, wie der Einfluss eines unterschiedlichen Durchdringungsgrads automatisierter Fahrfunktionen innerhalb der Verkehrssimulation untersucht. Abgeleitete Schlussfolgerungen werden anschließend innerhalb des fünften Kapitels hinsichtlich Reliabilität, Validität und Übertragbarkeit kritisch diskutiert. Das sechste Kapitel fasst die Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit zusammen und gibt auf deren Grundlage einen Ausblick auf weitere Forschungsarbeiten innerhalb des Gebiets der Absicherung höher automatisierter Fahrfunktionen.

2 Grundlagen

Innerhalb dieses Kapitels erfolgt zunächst eine Erläuterung der für diese Arbeit relevanten Terminologie. Anschließend erfolgt eine Beschreibung normativer Grundlagen im Kontext der Absicherung automatisierter Fahrfunktionen. Zudem wird eine Einführung in statistische Grundlagen gegeben, deren Kenntnis Voraussetzung für die Betrachtungen der nachfolgenden Kapitel ist. Es sei darauf hingewiesen, dass die Beschreibung des relevanten Stands der Technik in die Erläuterungen des dritten Kapitels aufgenommen wird.

2.1 Terminologie

Im nachfolgenden Abschnitt werden Begriffsdefinitionen eingeführt, welche ein eindeutiges Vokabular innerhalb dieser Arbeit ermöglichen. Die Definitionen sind Veröffentlichungen entnommen, welche das Ziel eines erleichterten domänenübergreifenden wissenschaftlichen Austauschs verfolgen.

2.1.1 Szene, Situation und Szenario

Die Begriffe der Szene, der Situation und des Szenarios werden innerhalb dieser Arbeit konsistent zu den Definitionen nach Ulbrich et al.⁴⁵ verwendet. Die innerhalb der Veröffentlichung eingeführten Definitionen werden nachfolgend aufgezeigt.

2.1.1.1 Szene

„Eine Szene beschreibt eine Momentaufnahme des Umfelds, welche die Szenerie, dynamische Elemente, die Selbstrepräsentation aller Akteure und Beobachter wie auch die Verknüpfung dieser Entitäten umfasst. Einzig eine Szenenrepräsentation in einer simulierten Welt kann allumfassend sein (objektive Szene, Ground Truth). In der realen Welt ist sie immer unvollständig, fehlerbehaftet, unsicherheitsbehaftet und aus der Perspektive eines oder mehrerer Beobachter (subjektive Szene).“⁴⁵

2.1.1.2 Situation

„Eine Situation beschreibt die Gesamtheit der Umstände, die für die Auswahl geeigneter Verhaltensmuster zu einem bestimmten Zeitpunkt zu berücksichtigen sind. Sie umfasst alle relevanten Bedingungen, Möglichkeiten und Determinanten von Handlungen. Eine Situation wird aus der Szene durch einen Prozess der Informationsauswahl und -augmentierung abgeleitet, basierend auf transienten (z.B. missionsspezifischen) wie auch permanenten Zielen und Werten. Folglich ist eine Situation immer subjektiv, indem sie die Sicht eines Elements repräsentiert.“⁴⁵

⁴⁵ Ulbrich, S. et al.: Definition Szene, Situation und Szenario (2015).

2.1.1.3 Szenario

„Ein Szenario beschreibt die zeitliche Entwicklung von Szenenelementen innerhalb einer Folge von Szenen, welche mit einer Startszene beginnt. Aktionen und Ereignisse ebenso wie Ziele und Werte können spezifiziert werden, um diese zeitliche Entwicklung in einem Szenario festzulegen. Im Gegensatz zu Szenen decken Szenarien eine gewisse Zeitspanne ab.“⁴⁶

Für tiefergehende Beschreibungen zur Entstehung dieser Definitionen sowie für Begriffserklärungen innerhalb der genannten Definitionen sei auf die Veröffentlichung verwiesen.⁴⁶

2.1.2 Abstraktionsebenen von Szenarien

In der Veröffentlichung von Menzel et al.^{47a} analysieren die Autoren die Anwendbarkeit eines szenarienbasierten Testansatzes in Hinblick auf die ISO 26262. Die Autoren stellen fest, dass Szenarien in verschiedenen Prozessschritten der ISO 26262 nutzbar sind, um die erforderlichen Arbeitsergebnisse zu erbringen. Dabei ergeben sich, abhängig von der jeweiligen Phase der ISO 26262, unterschiedliche Anforderungen an die Repräsentation von Szenarien, wie in Abbildung 2-1 ersichtlich. Die Konzeptphase verlangt eine Formulierung von Szenarien, welche durch Experten auf sprachlich gefasster Ebene durchgeführt werden kann, wohingegen die Formulierung innerhalb der Phase der Systementwicklung durch Parameter und zugehörige Wertebereiche zu definieren ist. Darüber hinaus werden zur Testfallgenerierung Szenarien benötigt, welche durch eine eindeutige Konfiguration von Parameterwerten charakterisiert sind. Auf Basis dieser unterschiedlichen Anforderungen definieren die Autoren drei Abstraktionsebenen von Szenarien, welche nachfolgend wiedergegeben werden. Die Definitionen sind der deutschen Fassung der Veröffentlichung entnommen und finden innerhalb dieser Arbeit Anwendung.⁴⁸

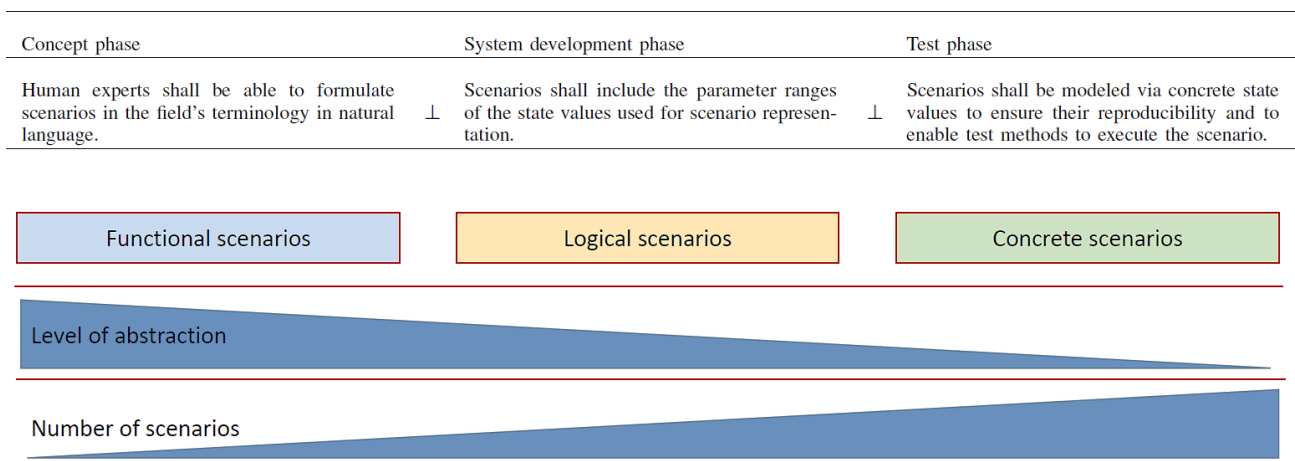


Abbildung 2-1 : Abstraktionsebenen von Szenarien mit Zuordnung zu Anforderungen jeweiliger Phase der ISO 26262^{47b}

⁴⁶ Ulbrich, S. et al.: Definition Szene, Situation und Szenario (2015).

⁴⁷ Menzel, T. et al.: Scenarios for Automated Vehicles (2018). a: -; b: S. 5.

⁴⁸ Bagschik, G. et al.: Szenarien für automatisierte Fahrzeuge (2017).

2.1.2.1 Funktionale Szenarien

„Funktionale Szenarien stellen Betriebsszenarien des Entwicklungsgegenstands auf semantischer Ebene dar. Die Entitäten und Beziehungen zwischen den Entitäten der Anwendungsdomäne werden in sprachlich gefassten Szenarien ausgedrückt. Die Szenarien sind widerspruchsfrei. Das Vokabular der funktionalen Szenarien ist spezifisch für den Anwendungsfall und die -domäne und kann unterschiedliche Detailgrade aufweisen.“⁴⁸

2.1.2.2 Logische Szenarien

„Logische Szenarien stellen Betriebsszenarien durch Entitäten und Beziehungen dieser Entitäten mithilfe von Parameterbereichen im Zustandsraum dar. Für die einzelnen Parameterbereiche können optional statistische Verteilungen angegeben werden. Zusätzlich können optional die Beziehungen der Parameterbereiche zueinander mithilfe von Korrelationen oder numerischen Bedingungen modelliert werden. Logische Szenarien enthalten eine formale Beschreibung von Szenarien.“⁴⁸

2.1.2.3 Konkrete Szenarien

„Konkrete Szenarien stellen Betriebsszenarien eindeutig durch Entitäten und Beziehungen dieser Entitäten mithilfe von festen Werten im Zustandsraum dar.“⁴⁸

Während das Level der Abstraktion von funktionalen Szenarien über logische Szenarien hin zu konkreten Szenarien abnimmt, steigt die Anzahl möglicher daraus resultierender Szenarien kontinuierlich. So ließe sich im Grenzfall einer unendlich feinen Diskretisierung der Parameter innerhalb eines logischen Szenarios eine unendliche Anzahl konkreter Szenarien aus diesem ableiten. Anzumerken ist, dass konkrete Szenarien als Grundlage für ausführbare Testfälle dienen und hierzu vorher um das erwartete Sollverhalten des Testgegenstands und die zu verwendende Testinfrastruktur zu erweitern sind.⁴⁹

2.1.3 Schema zur Darstellung von Einflussparametern

In der Veröffentlichung von Schuldt⁵⁰ wird ein Schema zur Beschreibung von Einflussparametern eines Szenarios entwickelt. Die Art der Darstellung orientiert sich dabei an Klassifikationsbäumen nach Grochtmann und Grimm⁵¹, welche sich durch ihren hierarchischen Aufbau für eine systematische Beschreibung von Einflussparametern anbieten. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die Definitionen der in Abbildung 2-2 dargestellten Bezeichnungen ab der Hierarchieebene der Elemente übernommen. Für die Definitionen der Begriffe *Szenario* und *Szene* sei auf Kapitel 2.1.1 verwiesen. Die logischen Beziehungen zwischen den verschiedenen Hierarchieebenen werden innerhalb der vorliegenden Arbeit ebenfalls konsistent angewendet und nachfolgend erläutert.

⁴⁹ Ulbrich, S. et al.: Definition Szene, Situation und Szenario (2015), S. 10 f.

⁵⁰ Schuldt, F.: Diss., Methodischer Test automatisierter Fahrunktionen (2017), S. 96 f.

⁵¹ Grochtmann, M.; Grimm, K.: Classification trees for partition testing (1993).

Auf der obersten Hierarchieebene ist das Szenario angesiedelt, welches nach Kapitel 2.1.1 aus mehreren Szenen besteht. Dies führt zu einer 1-zu-n-Beziehung zwischen Szenario und Szene. Eine Szene enthält wiederum m Elemente, welche als Unterkategorien innerhalb einer Ebene des 6-Ebenen-Modells aufzufassen sind, das in Kapitel 3.2.2 beschrieben wird. Ein Beispiel für ein Element wäre somit die Unterkategorie „Fahrstreifenmarkierungen“. Jedes der Elemente besitzt o Eigenschaften, die dieses beschreiben. Für das Beispiel der Fahrstreifenmarkierung wäre dies beispielsweise der Markierungstyp. Innerhalb dieser Arbeit sind die Begriffe „Eigenschaft“ und „Parameter“ äquivalent zu verstehen. Jede Eigenschaft weist k Wertebereiche auf, welche diskret oder kontinuierlich sind. Beispielsweise kann die Eigenschaft „Fahrstreifenbreite“ abhängig von der Position des Fahrstreifens innerhalb der Fahrbahn unterschiedliche Wertebereiche aufweisen. Die kontinuierlichen Wertebereiche lassen sich durch Diskretisierungsfunktionen charakterisieren. Diskretisierungsfunktionen sind nach Definition von Schuldt funktionale Beschreibungen der Größe der Diskretisierungsstufen über den jeweiligen Wertebereich.

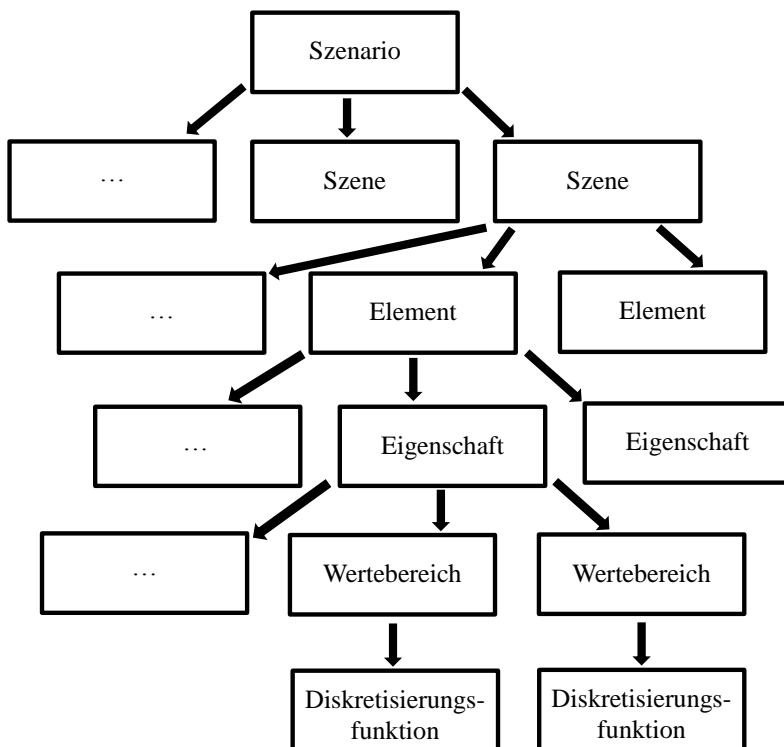


Abbildung 2-2: Schema zur Darstellung von Einflussparametern nach Schuldt⁵²

⁵² Eigene Darstellung nach Schuldt, F.: Diss., Methodischer Test automatisierter Fahrunktionen (2017), S. 97.

2.2 Normative Grundlagen

Zu Beginn dieses Abschnitts erfolgt eine Erläuterung der Kategorisierung und Nomenklatur von Systemen der Automation der Fahraufgabe. Danach werden die bestehenden Normen im Kontext der Absicherung automatisierter Fahrfunktionen beschrieben. Abschließend erfolgt eine Betrachtung der Standardisierung der Szenarienbeschreibung für simulationsbasierte Anwendungen.

2.2.1 Kategorisierung und Nomenklatur von Systemen der Automation der Fahraufgabe

Um ein umfassendes Verständnis von Fahrerassistenzsystemen und Fahrzeugautomation zu generieren, wird zunächst eine Kategorisierung dieser anhand der Aufgabenteilung zwischen Mensch und Maschine bei der Fahrzeugführung vorgestellt. Bei Betrachtung der unterschiedlichen Wirkweisen von Systemen der Automation der Fahraufgabe lassen sich deren unterschiedliche funktionale Ausprägungen in drei Kategorien einteilen. Kategorie A⁵⁴ bilden dabei „mittelbar“, über den Fahrer, auf die Fahrzeugführung einwirkende informierende Funktionen, die dem Fahrzeugführenden über die Mensch-Maschine-Schnittstelle zugänglich gemacht werden. Ein Ausgestaltungsbeispiel dieser Kategorie ist ein Verkehrszeichenassistent, welcher den Fahrzeugführenden über die aktuell vorliegende Geschwindigkeitsbegrenzung informiert. Kategorie B⁵⁴ wird durch kontinuierliche wirkende automatisierende Funktionen beschrieben, deren Charakteristikum ein unmittelbares Eingreifen in die Fahrzeugführung über längere Zeiträume beziehungsweise Fahrtabschnitte darstellt. Eine beispielhafte Ausführungsform dieser als „redundant-parallele“ Form der Arbeitsteilung zwischen Mensch und Maschine beschriebenen Systeme ist die adaptive Geschwindigkeitsregelung (ACC).⁵³ Die im nachfolgenden Abschnitt beschriebenen Detaillierungen der Kategorisierung verschiedener Automationsgrade beziehen sich ausschließlich auf Systeme der Kategorie B.⁵⁴ Eingreifende Notfallsysteme bilden die Kategorie C⁵⁴, denen in Hinblick auf die Kategorisierung anhand der Aufgabenteilung zwischen Mensch und Maschine besondere Bedeutung zukommt. Dies ist der Fall, da diese Systeme in plötzlich auftretenden Notsituationen dem Fahrzeugführenden überlegen sind und ihre Wirkung vorübergehend nicht mehr dessen Kontrolle unterliegen. Ein Ausführungsbeispiel dieser Kategorie ist der Notbremsassistent.⁵⁴

Eine detaillierte Klassifizierung für kontinuierlich automatisierende Systeme der Kategorie B wurde seit dem Jahr 2012, begonnen durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)⁵⁵, von mehreren Organisationen eingeführt. Dabei ist sowohl die von der amerikanischen „National Highway Safety Administration“ (NHTSA) veröffentlichte Kategorisierung⁵⁷ aus dem Jahr 2013 als auch der im Jahr 2014 veröffentlichte Standard J3016⁵⁶ zur Einstufung durch die SAE-International zu nennen.

⁵³ Maurer, M.: Entwurf und Test von Fahrerassistenzsystemen (2009), S. 43 f.

⁵⁴ Gasser, T. M. et al.: Rahmenbedingungen für die Fahrerassistenzsystementwicklung (2015), S. 28–31.

⁵⁵ Gasser, T. M.: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung (2012).

⁵⁶ SAE International: SAE J3016 (2018).

Da die NHTSA im Jahre 2016 innerhalb eines Berichts darauf hinweist, den Standard der SAE-International zur Beschreibung der verschiedenen Automationsstufen zu übernehmen⁵⁷, wird nachfolgend ausschließlich die Einstufung nach der aktuellen Version des Standards SAE J3016⁵⁶ beschrieben und mit der Kategorisierung der Bundesanstalt für Straßenwesen verglichen.

In Abbildung 2-3 ist die Kategorisierung der verschiedenen Automationslevel der Fahraufgabe nach dem Standard SAE J3016 sowie die zugehörige Einstufung der BASt dargestellt. Beiden Klassifizierungen ist gemein, dass diese jeweils unter dem Gesichtspunkt der Aufgabenteilung zwischen Fahrzeugführendem und System bei steigender Automation der Fahraufgabe erfolgt. Dies ist mit der eingangs beschriebenen übergeordneten Kategorisierung von Systemen zur Automation der Fahraufgabe konsistent. Die Abstufung der Automationslevel erfolgt ebenfalls analog, wobei darauf hinzuweisen ist, dass die wörtliche Bezeichnung in den Stufen eins, drei und 4 abweicht und im Standard SAE J3016 ein zusätzliches Automationslevel definiert ist.

Innerhalb der Klassifizierung nach SAE J3016 wird übergeordnet zwischen den Level null bis zwei und den Level drei bis fünf anhand der Befähigung des Systems der Automation der Fahraufgabe zur Übernahme der dynamischen Fahraufgabe (DDT⁵⁸) unterschieden. Die dynamische Fahraufgabe umfasst alle operativen und taktischen Funktionen, die erforderlich sind, um ein Fahrzeug im Straßenverkehr zu führen. Einerseits beinhaltet dies die anhaltende bzw. kontinuierlich wirksame Kontrolle von Längs- und Querdynamik. Andererseits beinhaltet die dynamische Fahraufgabe die Umfelderkennung sowie eine dieser angemessenen Reaktion durch Situationsverständnis, Verhaltensentscheidung und Handlung (OEDR⁵⁹). Weitere Kriterien zur Unterscheidung der Automationslevel sind die Rückfallebene der DDT sowie Betriebsbedingungen, in welchem das jeweilige System zur Automation der Fahraufgabe eingesetzt werden kann (ODD⁶⁰).

Die Level null bis zwei sind dadurch charakterisiert, dass der Fahrzeugführende die dynamische Fahraufgabe mindestens teilweise auszuführen hat. Bei Level null fehlt jedwede Automation der Fahraufgabe und der Fahrzeugführende hat innerhalb aller auftretender Betriebsbedingungen die dynamische Fahraufgabe komplett zu übernehmen. Unter Level eins werden Systeme gefasst, welche innerhalb vorgegebener Betriebsbedingungen entweder die Kontrolle der Längs- oder Querdynamik des Fahrzeugs übernehmen können, wobei der Fahrzeugführende den Rest der DDT übernimmt und die Rückfallebene bildet. Systeme, welche Level zwei zuzuordnen sind, besitzen die Fähigkeit in definierten Betriebssituationen sowohl Lateral- als auch Longitudinaldynamik des Fahrzeugs zu übernehmen, wobei der Fahrzeugführende weiterhin für den Rest der dynamischen Fahraufgabe in Form der OEDR verantwortlich ist und die Rückfallebene darstellt. Aktuell in Serie verfügbare Fahrerassistenzsysteme, welche einen adaptiven Geschwindigkeitsregler mit einem Spurhalteassistenten kombinieren, sind diesem Level zuzuordnen.

⁵⁷ NHTSA: Federal Automated Vehicles Policy (2016), S. 9.

⁵⁸ **D**ynamic **D**riving **T**ask.

⁵⁹ **O**bject and **E**vent **D**etection and **R**esponse.

⁶⁰ **O**perational **D**esign **D**omain.

Ab Level drei ist das System zur Automation der Fahraufgabe (ADS⁶¹) in der Lage die gesamte dynamische Fahraufgabe unter vorgegebenen Betriebsbedingungen auszuführen. Level drei ist dadurch charakterisiert, dass das System zur Automation der Fahraufgabe unter vorgegebenen Betriebsbedingungen die gesamte dynamische Fahraufgabe übernimmt, wobei der Fahrzeugführende nach einer Übernahmeaufforderung durch das ADS innerhalb einer Latenzzeit bereit zu sein hat die dynamische Fahraufgabe zu übernehmen.⁶² Zur Erklärung des mit der zusätzlichen Übernahme der OEDR verbundenen Absicherungsaufwands sei auf Kapitel 1.1 verwiesen.

Die Absicherung eines solchen Systems ist unter anderem Inhalt des Forschungsprojekts PEGASUS, welches den Anwendungsfall eines sogenannten Autobahn-Chauffeurs betrachtet. Die derzeit einzig bekannte serienreife Anwendung eines solchen Level drei Systems soll im Audi A8 in Form des „Audi AI traffic jam pilot“ Anwendung finden. Dessen Betriebsbedingungen sind durch Schnellstraßen mit zwei Richtungsfahrbahnen, welche durch Fahrzeugrückhaltesysteme beziehungsweise physische Barrieren begrenzt sind und Stausituationen sowie zählfließenden Verkehr bis zu Geschwindigkeiten von 60 km/h charakterisiert.⁶³ Hindernis für einen tatsächlichen Serieneinsatz sind die bisherigen rechtlichen Rahmenbedingungen, weshalb eine Serieneinführung sukzessive je nach Gesetzeslage erfolgen soll.⁶⁴ Die innerhalb dieser Arbeit entwickelten Konzepte beziehen sich ebenfalls auf ein System zur Automation der Fahraufgabe des Levels drei.

Systeme zur Automation der Fahraufgabe nach SAE Level vier sind durch einen Wegfall des Fahrzeugführenden als Rückfallebene gekennzeichnet. Das System ist in der Lage unter vorgegebenen Betriebsbedingungen die gesamte dynamische Fahraufgabe zu übernehmen und das Fahrzeug, wenn nötig, eigenständig in den risikominimalen Zustand zu überführen. Das höchste Automationslevel fünf nach SAE J3016 unterscheidet sich von Level vier insofern, dass die Einschränkung bezüglich der Fähigkeiten des Systems auf vorgegebene Betriebssituationen entfällt.⁶² Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die Kategorisierung der Automationslevel der Fahraufgabe stets nach dem Standard SAE J3016 vorgenommen.

⁶¹ Automated Driving System.

⁶² SAE International: SAE J3016 (2018), S. 3 ff.

⁶³ AUDI: The traffic jam pilot in the new Audi A8 (2017), S. 2.

⁶⁴ AUDI: Automatisiertes Fahren auf neuem Level (2017), S. 1.

Level	Name	Narrative definition	DDT		DDT fallback	ODD	BAST Level
			Sustained lateral and longitudinal vehicle motion control	OEDR			
Driver performs part or all of the DDT							
0	No Driving Automation	The performance by the <i>driver</i> of the entire DDT, even when enhanced by <i>active safety systems</i> .	Driver	Driver	Driver	n/a	Driver only
1	Driver Assistance	The <i>sustained</i> and ODD-specific execution by a <i>driving automation system</i> of either the <i>lateral</i> or the <i>longitudinal vehicle motion control</i> subtask of the DDT (but not both simultaneously) with the expectation that the <i>driver</i> performs the remainder of the DDT.	Driver and System	Driver	Driver	Limited	Assisted
2	Partial Driving Automation	The <i>sustained</i> and ODD-specific execution by a <i>driving automation system</i> of both the <i>lateral</i> and <i>longitudinal vehicle motion control</i> subtasks of the DDT with the expectation that the <i>driver</i> completes the OEDR subtask and <i>supervises the driving automation system</i> .	System	Driver	Driver	Limited	Partially Automated
ADS (“System”) performs the entire DDT (while engaged)			System	System	Fallback-ready user (becomes the driver during fallback)	Limited	Highly Automated
3	Conditional Driving Automation	The <i>sustained</i> and ODD-specific performance by an ADS of the entire DDT with the expectation that the DDT fallback-ready user is <i>receptive to ADS-issued requests to intervene</i> , as well as to DDT performance-relevant system failures in other vehicle systems, and will respond appropriately.					
4	High Driving Automation	The <i>sustained</i> and ODD-specific performance by an ADS of the entire DDT and DDT fallback without any expectation that a user will respond to a <i>request to intervene</i> .	System	System	System	Limited	Fully Automated
5	Full Driving Automation	The <i>sustained</i> and unconditional (i.e., not ODD-specific) performance by an ADS of the entire DDT and DDT fallback without any expectation that a user will respond to a <i>request to intervene</i> .	System	System	System	Unlimited	

Abbildung 2-3: Kategorisierung von ADS nach SAE J3016 und analoge Einstufung durch die BAST^{65,66}

2.2.2 ISO 26262 Road vehicles – Functional safety –

Die Norm 26262 Road vehicles – Functional safety – der International Organization for Standardization (ISO) basiert auf der IEC 61508, welche eine internationale Norm und den Stand der Technik zur Entwicklung von elektrischen, elektronischen und programmierbar elektronischen Systemen darstellt.⁶⁷ Innerhalb der IEC 61508 werden sicherheitsrelevante Systeme, von welchen die Rede ist, wenn ein Ausfall eines solchen Systems ein erhebliches Risiko für Mensch oder Umwelt darstellt, in sogenannte Sicherheitsanforderungsstufen (SIL⁶⁸) eingruppiert.⁶⁹

Die im Jahr 2011 veröffentlichte ISO 26262 adressiert die domänenspezifischen Bedürfnisse bei der Entwicklung sicherheitsrelevanter elektrischer und elektronischer Systeme innerhalb der Automobil-

⁶⁵ Eigene Darstellung nach: SAE International: SAE J3016 (2018), S. 19.

⁶⁶ Eigene Darstellung nach: Gasser, T. M.: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung (2012), S. 9.

⁶⁷ ISO: 26262 - Road vehicles - Functional safety - (2011), S. 5 ff.

⁶⁸ Safety Integrity Level.

⁶⁹ Grüner, S. et al.: Systemsicherheit (2013), S. 389 f.

industrie.⁶⁷ Dazu unterteilt die ISO 26262 die Sicherheitsanforderungen in Form so genannter Automotive Safety Integrity Level von ASIL A bis ASIL D, wobei ASIL D der höchsten Anforderungsstufe entspricht. Die ASIL-Einstufung erfolgt innerhalb der Gefährdungsanalyse und Risikobewertung. Die für die Einstufung bestimmenden Parameter sind die Auftretenswahrscheinlichkeit einer Gefährdungssituation sowie die im jeweiligen Fall resultierende Schadensschwere und Kontrollierbarkeit durch den Fahrzeugführenden. Für jede ASIL-Einstufung hat die Definition eines Sicherheitsziels zu erfolgen. Die aus der ASIL-Einstufung resultierenden Anforderungen bei der Entwicklung des entsprechenden mechatronischen Systems hängen vom vergebenen ASIL ab. Je nach Konfiguration der genannten Einflussparameter erfolgt eine Einstufung in die Klasse Qualitätsmanagement (QM), aus welcher keine weiteren Anforderungen für die Konformität mit der ISO 26262 resultieren.⁶⁷

Durch Veröffentlichung der zweiten Auflage der ISO 26262 im Jahr 2018 entfällt die Beschränkung auf Pkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht ≤ 3.5 Tonnen. Für weitere Anpassungen, beispielsweise im Bereich der Cyber-Sicherheit, sei auf die Norm verwiesen.⁷⁰ Die Vereinbarkeit der ISO 26262, deren übergeordneter Ablauf auf dem V-Modell basiert, mit einem szenarienbasierten Testansatz ist in Kapitel 1.3 beschrieben.

Der Begriff der Sicherheit wird im Zusammenhang mit der ISO 26262 als Abwesenheit eines nicht tolerierbaren Restrisikos definiert. Dabei ist Sicherheit nach gegenwärtigem Verständnis durch das aufeinander abgestimmte Verhalten funktionaler Sicherheit, Sicherheit der Sollfunktion (SOTIF⁷¹) sowie Cyber-Sicherheit zu erreichen.⁷² Die funktionale Sicherheit liegt innerhalb des Betrachtungsrahmens der ISO 26262. Diese beinhaltet die Bewertung im Falle eines potenziellen Funktionsausfalls mit dem Ziel der Umsetzung geeigneter Maßnahmen zur Vermeidung systematischer Fehler und zufälliger Funktionsausfälle.⁷³

Für Systeme, deren Funktion auf einer internen oder externen Umfelderkennung basiert, kann potenziell gefährliches Verhalten durch die funktionalen Leistungsgrenzen der Sollfunktion resultieren, die frei von Fehlern innerhalb des Betrachtungsrahmens der ISO 26262 ist. Als Beispiel ist ein fehlerhaftes Situationsverständnis einer höher automatisierten Fahrfunktion zu nennen, welches zu einem unsicheren Systemzustand führt. Dieser Umstand wird in der nachfolgend beschriebenen ISO/PAS 21448:2019 (SOTIF-Norm) adressiert.⁷⁴

2.2.3 ISO/PAS 21448:2019 Road vehicles – Safety of the intended functionality –

Gegenstand der SOTIF-Norm ist die Sicherheit der Sollfunktion. Innerhalb der SOTIF-Norm wird die Sicherheit der Sollfunktion als Abwesenheit eines nicht tolerierbaren Restrisikos durch potenziell gefährliches Verhalten, das auf funktionale Leistungsgrenzen der Sollfunktion oder vorhersehbares

⁷⁰ ISO: 26262 - Road vehicles - Functional safety - (2018).

⁷¹ Safety of the intended functionality.

⁷² Schnieder, L.; Hosse, R.: Leitfaden SOTIF (2019), S. 3.

⁷³ ISO: 26262 - Road vehicles - Functional safety - (2011), S. 5.

⁷⁴ ISO: 21448:2019 Road Vehicles -- Safety of the intended functionality (2019), S. 8.

Fehlverhalten durch den Anwender zurückzuführen ist, verstanden. Dabei wird der Schwerpunkt innerhalb der Norm auf Systeme, deren ordnungsgemäßes Situationsverständnis sicherheitsrelevant ist und bei welchen dieses Situationsverständnis auf komplexen Sensoren sowie komplexen Algorithmen basiert, gelegt. In der Norm werden beispielhaft automatisierte Fahrfunktionen mit einem SAE Level ≤ 2 genannt. Zudem wird angemerkt, dass die Norm auch für höher automatisierte Fahrfunktionen anwendbar ist, dazu aber weitere Maßnahmen nötig sein können.^{75a} Die Norm zielt auf eine Reduktion unbekannter und gleichzeitig unsicherer Systemzustände ab, um anschließend Maßnahmen für die dann bekannten und unsicheren Systemzustände abzuleiten.⁷⁶

Ein Beispiel für eine Leistungsgrenze ist eine nicht ausreichende Robustheit einer Funktion in Hinblick auf die Variation von Sensoreingangsdaten durch sich verändernde Umweltbedingungen. Maßnahmen der SOTIF-Norm erstrecken sich von der Entwicklungsphase über die Verifikationsphase bis hin zur Validierungsphase. Von der Norm wird als Maßnahme in Bezug auf die Verifikationsphase die Durchführung von Testfällen mit hoher Testabdeckung relevanter Szenarien unter Nutzung von XiL-Methoden erwähnt.^{75a} Dies motiviert das Ziel der Industrialisierung des szenariobasierten Testansatzes zusätzlich. Darüber hinaus verdeutlicht dies die Wichtigkeit eines systematischen Ansatzes zur Generierung konkreter Szenarien, damit die angesprochene hohe Testabdeckung in der Praxis umsetzbar ist. Es sei darauf hingewiesen, dass die SOTIF-Norm im Vergleich zur ISO 26262 keine Metrik beinhaltet, welche einer Funktion eine Sicherheitsanforderungsstufe zuordnet.⁷⁶ Für tiefergehende Erläuterungen sei auf die Norm verwiesen.^{75b}

2.2.4 Standardisierung der Szenarienbeschreibung für simulationsbasierte Anwendungen

Mit dem Ziel der einheitlichen, von der Simulationsumgebung unabhängigen, Beschreibung eines Straßennetzwerkes entstand im Jahr 2006 das OpenDRIVE-Projekt durch das Unternehmen VIRES Simulationstechnologie GmbH. Motivation dafür war die Tatsache, dass die verschiedenen Anwender der von VIRES zur Verfügung gestellten Datenbanken für die Simulation jeweils abweichende Formate für die Beschreibung eines Straßennetzwerkes benötigten, obwohl der entsprechende Inhalt nahezu identisch war.⁷⁷ Resultat der Arbeiten sind die im Rahmen des PEGASUS-Projekts weiterentwickelten⁷⁸ und mittlerweile von der Association for Standardization of Automation and Measuring Systems (ASAM) standardisierten Formate OpenDRIVE, OpenSCENARIO und OpenCRG. Diese dienen der standardisierten Beschreibung der Gesamtheit eines Szenarios für die Fahrzeugsimulation innerhalb der verschiedenen XiL-Methoden.⁷⁹

In Anlehnung an das 6-Ebenen-Modell, auf welches in Kapitel 3.2.2 noch detailliert eingegangen wird, beinhaltet das OpenDRIVE-Format die Beschreibung der stationären Elemente eines Szenarios

⁷⁵ ISO: 21448:2019 Road Vehicles -- Safety of the intended functionality (2019). a: S. 5-8; b: - .

⁷⁶ Schnieder, L.; Hosse, R.: Leitfaden SOTIF (2019), S. 9–10.

⁷⁷ VIRES Simulationstechnologie GmbH: OpenDRIVE.

⁷⁸ BMWi: PEGASUS Method (2019), S. 26.

⁷⁹ ASAM: ASAM Standards.

(Ebenen eins bis drei) in Form einer systematischen Beschreibung von Straßennetzwerken und ist als de facto Standard der Industrie etabliert. Die Daten zur Definition der Straßennetzwerke sind aus verschiedenen Quellen, wie manuellen Straßennetzwerkeditoren, konvertierten Kartendaten oder konvertierten Vermessungen realer Straßennetzwerke ableitbar.⁸⁰ Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Simulationsprogramme zur Verkehrs- und Fahrdynamiksimulation in Form von SUMO und IPG CarMaker erlauben die Nutzung des OpenDRIVE-Formats zur Abbildung des Straßennetzwerks. Die Datenorganisation des Formats erfolgt hierarchisch unter Nutzung der Extensible Markup Language (XML), welche auch für die Umsetzung des OpenSCENARIO-Formats verwendet wird.⁸¹

Das OpenSCENARIO-Format beinhaltet die Beschreibung der dynamischen Elemente eines Szenarios bestehend aus komplexen Manövern verschiedener Verkehrsteilnehmer. Darüber hinaus erlaubt das Format eine Beschreibung weiterer Aspekte wie beispielsweise die Definition vorliegender Umweltbedingungen.⁸² Anzumerken ist, dass das OpenSCENARIO Projekt seit dem Jahr 2014 besteht und sich bezogen auf den Reifegrad und Standardisierungsprozess im Vergleich zum OpenDRIVE-Format in einem früheren Stadium befindet.

Das die Beschreibung der Gesamtheit eines Szenarios komplettierende Format OpenCRG dient der mikroskopischen Beschreibung von Fahrbahnoberflächen und schließt die Lücke zur makroskopischen Beschreibung des Straßennetzwerkes durch OpenDRIVE. Das OpenCRG-Format liegt in Form von ASCII- und Binärdateien vor und beinhaltet Oberflächenerhebungsdaten hoher Auflösung.⁸³ In Hinblick auf die Anwendung eines szenarienbasierten Testansatzes können die durch eine OpenCRG-Datei vorliegenden Informationen beispielsweise zur Definition des Kraftschlussbeiwerts zwischen Reifen und Fahrbahn genutzt werden.

⁸⁰ ASAM: ASAM OpenDRIVE.

⁸¹ VIRES Simulationstechnologie GmbH: OpenDRIVE Format Specification (2019), S. 7.

⁸² ASAM: ASAM OpenSCENARIO.

⁸³ ASAM: ASAM OpenCRG.

2.3 Statistische Grundlagen

Nachfolgend werden die statistischen Grundlagen, deren Kenntnis für das Verständnis der Betrachtungen dieser Arbeit erforderlich ist, eingeführt. Nach der Erläuterung notwendiger Grundbegriffe werden Verfahren der deskriptiven Statistik aufgezeigt. Anschließend erfolgt einer Beschreibung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion sowie der Verteilungsfunktion, welche im Rahmen der statistischen Auswertungen relevant sind. Abschließend wird eine Einführung in die nichtparametrische Dichteschätzung gegeben.

2.3.1 Grundbegriffe

Innerhalb dieses Teilkapitels werden Grundbegriffe der Statistik definiert, welche für nachfolgende Kapitel relevant sind. Für tiefergehende Begriffserläuterungen sei auf die Literatur verwiesen.^{84,85}

2.3.1.1 Grundgesamtheit

„In jeder statistischen Untersuchung werden Daten über eine bestimmte Menge einzelner Objekte ermittelt. Diese Menge von räumlich und zeitlich eindeutig definierten Objekten, die hinsichtlich bestimmter – vom Ziel der Untersuchung abhängender – Kriterien übereinstimmen wird als Grundgesamtheit bezeichnet. Eine andere, häufig anzutreffende Bezeichnung ist Population.“⁸⁴

2.3.1.2 Stichprobe

„Ziel jeder statistischen Untersuchung ist es, anhand von Daten Aussagen über eine Grundgesamtheit zu treffen. Aus praktischen Erwägungen kann in der Regel jedoch nicht jede statistische Einheit der Grundgesamtheit zur Ermittlung von Daten herangezogen werden [...]. Aus den genannten Gründen werden Daten oft nur über eine Teilmenge der Objekte der Grundgesamtheit ermittelt. Eine solche Teilmenge wird als Stichprobe bezeichnet.“⁸⁴

2.3.1.3 Merkmale und Merkmalsausprägungen

„Eine spezielle Eigenschaft statistischer Einheiten, die im Hinblick auf das Ziel einer konkreten statistischen Untersuchung von Interesse ist, wird als Merkmal bezeichnet [...]. Die möglichen Werte, die ein Merkmal annehmen kann, werden als Merkmalsausprägungen bezeichnet.“⁸⁴

2.3.1.4 Datensatz

„Die Liste aller Daten, die bei einer Untersuchung an den statistischen Einheiten gemessen bzw. ermittelt wurden (also die Liste der beobachteten Merkmalsausprägungen), wird als Urliste oder Datensatz bezeichnet.“⁸⁴

⁸⁴ Cramer, E.; Kramps, U.: Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik (2017), S. 1 ff.

⁸⁵ Eckstein, P. P.: Statistik für Wirtschaftswissenschaftler (2014), S. 13 ff.

2.3.1.5 Messbarkeitseigenschaften

„Merkmale weisen im Wesentlichen drei verschiedene Messbarkeitseigenschaften auf. Das einfachste Messniveau ist die Unterscheidung der Merkmalsausprägung der Art nach. Es wird als nominales Messniveau bezeichnet. Die Merkmalsausprägungen werden als Kategorie bezeichnet. Kann eine eindeutige Reihenfolge in den Merkmalsausprägungen erzeugt werden, so liegt ein ordinales Messniveau vor. Ist der Abstand zwischen den Merkmalsausprägungen definiert, so wird von einem metrischen Messniveau gesprochen.“^{86a} Zum Beispiel ist es möglich den Abstand zwischen zwei Fahrzeugen in Metern zu messen. Die Art des Messniveaus bestimmt dabei die zur Verfügung stehenden Analyseverfahren.^{86a}

2.3.1.6 Quantil

Quantile \tilde{x}_α sind die Merkmalsausprägungen, die den prozentualen Anteil α der kleinsten Werte von dem übrigen Anteil trennen.^{86b} Der Median x_{med} ist der kleinste Wert, der mindestens 50 % der aufsteigend geordneten Werte erfasst und entspricht damit dem Quantil $\tilde{x}_{0.5}$.^{87a}

2.3.2 Datendeskription

Das Kernstück der statistischen Deskription empirisch erhobener Daten besteht in der statistischen Verteilungsanalyse. Diese zielt auf die Beschreibung der Häufigkeitsverteilung eines statistischen Erhebungsmerkmals ab. Dabei bildet die Charakterisierung der Verteilung unter Nutzung von Verteilungsmaßzahlen und/oder grafischen Darstellungen den Schwerpunkt.^{88a} Nachfolgend werden für die vorliegende Arbeit relevante Lage- und Streuungsmaße sowie Möglichkeiten der grafischen Darstellung beschrieben.

2.3.2.1 Lagemaße und Streuungsmaße

„Lagemaße sind spezielle Kennzahlen zur parametrischen Beschreibung einer Verteilung eines statistischen Erhebungsmerkmals. Ihre Bedeutung erklärt sich aus ihrer repräsentativen Lage innerhalb einer Verteilung. Dabei kommt den Repräsentanten der Mitte, die in der statistischen Methodenlehre auch als „Mittelwerte“ bezeichnet werden, eine besondere Bedeutung zu.“^{88b} Tabelle 2-1 gibt eine Übersicht über die in der Statistik applizierbaren Lagemaße Modus, Median und arithmetisches Mittel. Die mathematische Formulierung erfolgt über das betrachtete Merkmal x , dessen unterschiedliche Ausprägungen a_j sowie die Häufigkeiten n_j dieser Ausprägungen.

⁸⁶ Kohn, W.; Öztürk, R.: Statistik für Ökonomen (2017). a: S. 17-18; b: S. 47.

⁸⁷ Toutenburg, H.; Knöfel, P.: Six Sigma (2007). a: S. 43; b: Eigene Darstellung nach S. 81.

⁸⁸ Eckstein, P. P.: Statistik für Wirtschaftswissenschaftler (2019). a: S. 75; b: S.107.

Tabelle 2-1: Applizierbare Lagemaße^{87b}

Lagemaße			
Bezeichnung	Mathematische Formulierung	Beschreibung	Anwendbarkeit Messniveaus
Modus	$\hat{x}_M = a_j \leftrightarrow \max \{n_1, \dots, n_k\}$	Ausprägung eines Erhebungsmerkmals, die am häufigsten auftritt	Alle Niveaus
Median	$x_{\text{med}} = x_{\left(\frac{n+1}{2}\right)}$ (falls n ungerade) $x_{\text{med}} = \frac{1}{2} \left(x_{\left(\frac{n}{2}\right)} + x_{\left(\frac{n+1}{2}\right)} \right)$ (falls n gerade)	Kleinster Wert, der mindestens 50 % der aufsteigend geordneten Werte erfasst, entspricht dem Quantil $\tilde{x}_{0,5}$	Mindestens ordinal
Arithmetisches Mittel	$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$	Gleichmäßige Verteilung der Summe der Merkmalsausprägung auf statistische Einheiten	Metrisch

„Häufig reichen Lagemaße zur Charakterisierung einer Häufigkeitsverteilung eines statistischen Erhebungsmerkmals nicht aus. Man ergänzt sie daher durch Maßzahlen, die erkennen lassen, ob die Merkmalsausprägungen eines [...] Erhebungsmerkmals mehr oder weniger stark um ein sogenanntes Lagemaß streuen.“⁸⁹ In Tabelle 2-2 sind applizierbare Streuungsmaße aufgezeigt. Anzumerken ist, dass zur Anwendung eines Streuungsmaßes ein Abstands begriff Voraussetzung ist und deshalb das Vorliegen eines metrischen Merkmals erforderlich ist.⁹⁰

Tabelle 2-2: Applizierbare Streuungsmaße⁹⁰

Streuungsmaße			
Bezeichnung	Mathematische Formulierung	Beschreibung	Anmerkungen
Spannweite	$R = a_{\max} - a_{\min}$	Differenz zwischen größter und kleinster Merkmalsausprägung	Hohe Empfindlichkeit gegenüber Ausreißern
Zentraler Quartilsabstand	$Q = \tilde{x}_{0,75} - \tilde{x}_{0,25}$	Bereich, in welchem mindestens 50 % aller „zentralen“ Merkmalsausprägungen liegen	Robust gegenüber Ausreißern
Varianz	$s_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$	Mittlere quadratische Abweichung vom arithmetischen Mittel	Varianzenvergleich nur bei gleicher Anzahl an Merkmalsausprägungen möglich

⁸⁹ Eckstein, P. P.: Statistik für Wirtschaftswissenschaftler (2019), S. 129.⁹⁰ Cramer, E.; Kramps, U.: Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik (2017), S. 34–36.

Standardabweichung	$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$	Positive Wurzel der Varianz	Transformation der Dimension des Streuungsmaßes in Einheit des Merkmals
Variationskoeffizient	$V = \frac{s_x}{\bar{x}}$	Quotient aus Standardabweichung und arithmetischem Mittel, prozentuale Streuung um Mittelwert	Nur für ausschließlich positive Merkmalsausprägungen sinnvoll Relatives Streuungsmaß, Variation der Merkmalsausprägung unabhängig von Größenordnung vergleichbar

2.3.2.2 Grafische Darstellung

Da sich das menschliche Auge zur Analyse von Daten eignet, spielt die Datenvisualisierung für die Analyse ebenfalls eine Rolle. Abhängig davon, ob das Ziel die Visualisierung der Merkmalsausprägungen eines Merkmals ist oder ein Vergleich mehrerer Merkmale angestrebt wird, sind verschiedene Visualisierungsmethoden anwendbar.⁹¹ Nachfolgend wird die Visualisierung der Merkmalsausprägungen eines Merkmals durch Histogramme und die Visualisierung zum Vergleich mehrerer Merkmale durch Box-Whisker-Plots erläutert.

Es ist möglich, dass in Datensätzen sehr viele verschiedene Merkmalsausprägungen vorliegen. In diesen Fällen ist die Darstellung solcher Datensätze durch Diagramme, welche auf der Häufigkeitsverteilung der Beobachtungswerte basieren, in der Regel ungeeignet, da diese zu komprimierten und damit unübersichtlichen Visualisierungen der Daten führt. Die Zusammenfassung von Merkmalsausprägungen in Klassen bildet einen Ausweg aus dieser Problematik. Das Histogramm steht dabei als grafisches Hilfsmittel zur Verfügung.^{92a} Charakteristikum eines Histogramms ist die Repräsentation der Klassenhäufigkeiten durch die Flächeninhalte der aneinandergrenzenden Rechtecke. Der Umstand, dass in einem Histogramm nicht die Höhe eines Rechtecks der entsprechenden Merkmalsausprägungsklasse, sondern stets dessen Fläche der statistische Repräsentant der jeweiligen Klassenhäufigkeit ist, wird als Flächenproportionalität bezeichnet.⁹³ Die Höhe eines Rechtecks ist dabei durch den Quotient aus relativer oder absoluter Häufigkeit und der Klassenbreite gegeben.^{92a} Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die Höhe des Rechtecks bei fester Klassenbreite der relativen beziehungsweise absoluten Häufigkeit entspricht. Die Berechnung der Häufigkeitsdichten auf Basis relativer Klassenhäufigkeiten erweist sich als vorteilhaft, da sich auf diese Weise anschaulich zeigen lässt,

⁹¹ Runkler, T. A.: Data Mining (2015), S. 37.

⁹² Cramer, E.; Kramps, U.: Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik (2017). a: S. 44-45; b: S. 41.

⁹³ Eckstein, P. P.: Statistik für Wirtschaftswissenschaftler (2019), S. 105.

dass sich die Flächeninhalte innerhalb eines Diagramms stets zu eins addieren. Ein flächenproportionales Histogramm mit einer normierten Gesamtfläche von eins wird in diesem Zusammenhang als normiertes Histogramm bezeichnet.⁹³

Als Methode zur Visualisierung der Lage und Streuung eines Datensatzes eignet sich der Box-Whisker-Plot besonders zum Vergleich mehrerer Datensätze.^{92b} Ein Box-Whisker-Plot eines metrischen Merkmals, das für eine statistische Grundgesamtheit erhoben wurde, ist durch die fünf Verteilungsmaßzahlen in Form des kleinsten Merkmalswerts x_{\min} , des unteren Quartils $\tilde{x}_{0.25}$, des Medians $\tilde{x}_{0.5}$, des oberen Quartils $\tilde{x}_{0.75}$ sowie des größten Merkmalswerts x_{\max} definiert und in Abbildung 2-4 dargestellt. Es sei angemerkt, dass die Länge des Whiskers, welche in der Abbildung durch den Betrag der Differenz des größten (kleinsten) Merkmalswerts x_{\max} (x_{\min}) und des oberen (unteren) Quartils $\tilde{x}_{0.75}$ ($\tilde{x}_{0.25}$) gegeben ist, abweichend definierbar ist. Die Definition der Länge des Whiskers erfolgt beispielsweise in MATLAB für den in der Abbildung rechts dargestellten Whisker durch $\tilde{x}_{0.75} + 1.5 \cdot (\tilde{x}_{0.75} - \tilde{x}_{0.25})$, wobei die außerhalb dieses Bereichs liegenden Merkmalsausprägungen zusätzlich als Ausreißer dargestellt werden. Die Verhältnisse gestalten sich für den linken Whisker analog.⁹⁴

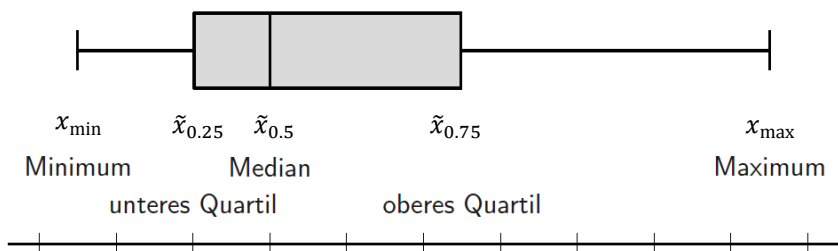


Abbildung 2-4: Visualisierung der Lage und Streuung eines Datensatzes als Box-Whisker-Plot^{92b}

2.3.3 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion und Verteilungsfunktion

In vielen Bereichen der Wissenschaft, Technik und Wirtschaft werden Modelle für reale, zufallsabhängige Vorgänge eingesetzt. Diese Modelle bilden das theoretische Fundament der schließenden Statistik. Zur Beschreibung verschiedener Modelle werden unter anderem die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion sowie die Verteilungsfunktion herangezogen. Dabei ist die Riemann-Dichte bzw. Riemann-Dichtefunktion durch eine integrierbare Funktion $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ mit $f(x) \geq 0$, $x \in \mathbb{R}$ und $\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1$ definiert. Durch die Beschreibung von Wahrscheinlichkeiten P , wie in Formel (2-1) aufgezeigt, lässt sich ein stets eindeutiges Wahrscheinlichkeitsmaß definieren.⁹⁵

$$F(x) = P((-\infty, x]) = \int_{-\infty}^x f(y) dy, \quad x \in \mathbb{R} \quad (2-1)$$

Die Funktion $F(x)$ wird als Verteilungsfunktion bezeichnet. In Abbildung 2-5 sind die Riemann-Dichten, welche in der vorliegenden Arbeit auch als Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion bezeichnet

⁹⁴ Mathworks: MATLAB Dokumentation.

werden sowie die zugehörigen Verteilungsfunktionen für verschieden parametrisierte Gammaverteilungen dargestellt.⁹⁵ Es sei darauf hingewiesen, dass neben stetigen Wahrscheinlichkeitsverteilungen mit Riemann-Dichte allgemeinere Modelle existieren, für welche eine Definition über das Lebesgue-Integral erforderlich ist. Diese sind für die vorliegende Arbeit nicht relevant.

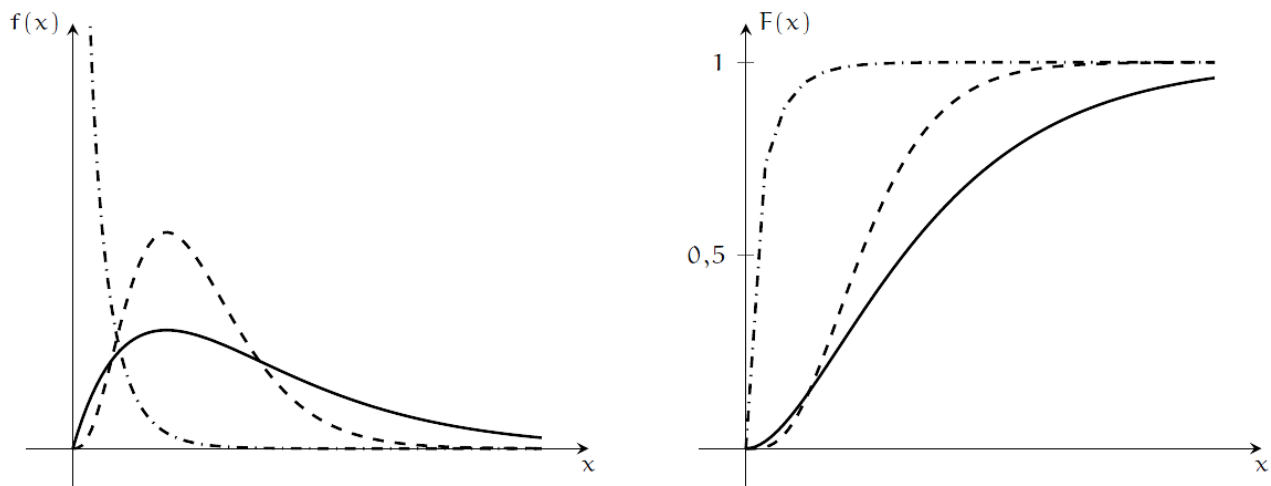


Abbildung 2-5: Riemann-Dichten und zugehörige Verteilungsfunktionen für verschiedene Gammaverteilungen⁹⁵

2.3.4 Nichtparametrische Dichteschätzung

Die Grundidee der schließenden Statistik ist ein wahrscheinlichkeitstheoretisch begründeter Schluss vom Teil aufs Ganze. Dabei wird unter Nutzung mathematisch-statistischer Verfahren versucht anhand von Stichproben und unter Einbeziehung von Wahrscheinlichkeitsmodellen Aussagen über unbekannte Parameter der statistischen Grundgesamtheit zu treffen.⁹⁶ Im Gegensatz dazu versucht die nichtparametrische Dichteschätzung auf Grundlage gegebener Daten die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion zu schätzen, ohne eine Annahme über die zugrunde liegende Verteilungsfamilie zu treffen. Dabei erfolgt die nichtparametrische Dichteschätzung normalerweise lokal, das heißt es wird eine Näherung der Dichtefunktion f an der Stelle x gesucht.

Das im vorherigen Abschnitt beschriebene Histogramm stellt das älteste Verfahren zur Dichteschätzung dar. Da die Flächen der Rechtecke über den Intervallen bei n Beobachtungen den relativen Häufigkeiten n_i/n entsprechen ist die Höhe f_i eines Rechtecks beziehungsweise die Dichte durch den Quotient der relativen Häufigkeit und der Intervallbreite $(c_{i-1}, c_i]$ definiert, wie in Formel (2-2) dargestellt.⁹⁷

$$f_i = \frac{n_i}{n(c_i - c_{i-1})} \quad (2-2)$$

⁹⁵ Cramer, E.; Kramps, U.: Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik (2017), S. 175 ff.

⁹⁶ Eckstein, P. P.: Statistik für Wirtschaftswissenschaftler (2019), S. 235.

⁹⁷ Duller, C.: Einführung in die nichtparametrische Statistik (2018), S. 267 ff.

Bei Interpretation der Höhe als Funktion, welche jeder Merkmalsausprägung x einen Funktionswert $f(x)$ zuordnet, ergibt sich auf Basis des Histogramms ein erster Schätzer der Dichte $\hat{f}_{\text{Hist}}(x)$ wie in Formel (2-3) aufgezeigt. Hierbei ist I eine Indikatorfunktion, welche gleich eins ist, wenn sich der entsprechende Wert x innerhalb des vorliegenden Intervalls der Breite $(c_{i-1}, c_i]$ befindet und andernfalls gleich null ist.⁹⁸

$$\hat{f}_{\text{Hist}}(x) = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{n(c_i - c_{i-1})} I_{(c_{i-1}, c_i]}(x) \quad (2-3)$$

Die resultierende Dichteschätzung durch ein Histogramm ist nur stückweise stetig und lokal verzerrt. Eine alternative Dichteschätzung bieten Kerndichteschätzer, deren Herleitung über den zentralen Differenzenquotient der Verteilungsfunktion möglich ist. Wird die variable Intervallbreite $(c_{i-1}, c_i]$ in Formel (2-3) durch eine feste Intervallbreite h ersetzt und die einzelnen Summanden durch eine allgemeine Kernfunktion K ersetzt, lässt sich die Kerndichteschätzung $\hat{f}_{h,K}(x)$ wie in Formel (2-4) beschreiben.

$$\hat{f}_{h,K}(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right) \quad (2-4)$$

Die Kernfunktion muss gewisse Eigenschaften wie Normiertheit und Nichtnegativität aufweisen. Die Intervallbreite h wird für diesen allgemeineren Fall auch als Bandbreite bezeichnet und ist Glattheitsparameter der Kerndichtefunktion. In der Praxis Anwendung findende Kerne sind unter anderem der Rechteckkern, welcher als Schätzung eines Histogramms mit der Schrittweite $2h$ interpretierbar ist, sowie der Epanechnikov-Kern und der Gauß-Kern. Die mittlere quadratische Abweichung (MSE⁹⁹) sowie deren Integral (MISE¹⁰⁰) dienen als Maße zur Quantifizierung der Abweichung zwischen tatsächlicher und geschätzter Dichte. Es hat sich herausgestellt, dass der Epanechnikov-Kern die besten Ergebnisse in Bezug auf diese Kennwerte liefert, weshalb dieser in der vorliegenden Arbeit Anwendung findet. Die Definition von dessen Kernfunktion ist in Formel (2-5) dargestellt.

$$K_{\text{Epan}}(x) = \begin{cases} \frac{3}{4} (1 - x^2) & \text{für } |x| < 1 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (2-5)$$

In Abbildung 2-6 ist die Kerndichteschätzung von durchschnittlichen Regenmengen in Zoll aus US-Bundesstaaten bei Schätzung mit dem Epanechnikov-Kern und einer Bandbreite von einem Zoll aufgezeigt.⁹⁸

⁹⁸ Duller, C.: Einführung in die nichtparametrische Statistik (2018), S. 267 ff.

⁹⁹ Mean squared error.

¹⁰⁰ Mean integrated squared error.

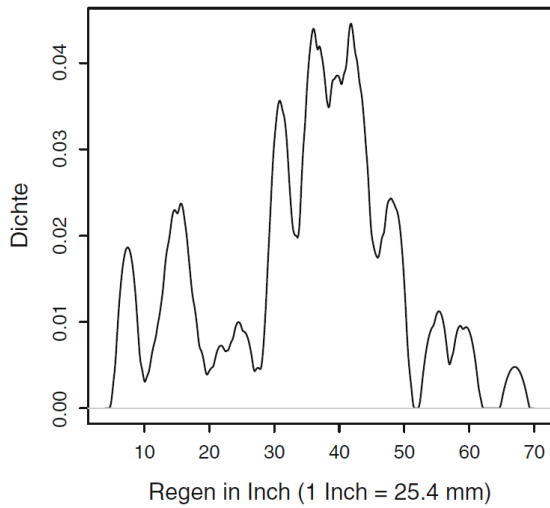


Abbildung 2-6: Kerndichteschätzung durchschnittlicher Regenmengen in US-Bundesstaaten (Epanechnikov-Kern)⁹⁸

3 Entwicklung einer Methodik zur systematischen Auswahl logischer Szenarien und Definition konkreter Szenarien

Innerhalb dieses Kapitels wird die Entwicklung einer Methodik zur systematischen Auswahl logischer Szenarien sowie deren Überführung in konkrete Szenarien beschrieben. Auf Basis dessen wird aufgezeigt wie der zugehörige Parameterraum sowie der nötige Testumfang bestimmt werden. Das Vorgehen zur Entwicklung der Methodik bildet das in Kap. 1.3 beschriebene V-Modell, innerhalb dessen, zur Bewältigung der verschiedenen Arbeitsschritte, die unterschiedlichen Abstraktionsebenen von Szenarien zu berücksichtigen sind. Aus diesem Grund wird eine Methodik entwickelt, deren Basis funktionale Szenarien sind, welche systematisch in logische Szenarien und schließlich konkrete Szenarien überführt werden. Dies adressiert den Erweiterungsbedarf des in Kap. 1.2 vorgestellten Simulationsframeworks.

In den nachfolgenden Ausführungen werden zunächst die makroskopischen Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik definiert und zusätzliche prozessschrittspezifische Anforderungen festgelegt. Anschließend wird der Stand der Technik im Bereich der Transformation funktionaler in konkrete Szenarien dargestellt. Dabei werden die verschiedenen vorgestellten Ansätze, nach Analyse spezifischer Vor- und Nachteile, auf Erfüllung der Anforderungen überprüft. Schließlich wird, auf Basis der Bewertung der verschiedenen Ansätze, eine Methodik zur Überführung funktionaler in konkrete Szenarien vorgestellt. Es sei darauf hingewiesen, dass die Entwicklung der Methodik stets vor dem Hintergrund der Absicherung einer höher automatisierten Fahrfunktion des SAE Levels 3 für den Anwendungsfall in Stausituationen¹⁰¹ erfolgt.

3.1 Anforderungen

In Anlehnung an die Veröffentlichung von Schuldt¹⁰² werden im nachfolgenden Kapitel zunächst makroskopische Anforderungen an die zu entwickelte Methodik definiert, bevor zusätzliche prozessschrittspezifische Anforderungen festgelegt werden. Für eine hohe Kompatibilität des jeweiligen Prozessschrittes mit der Gesamtmethodik muss jeder dieser sowohl die makroskopischen als auch die etwaigen prozessschrittspezifischen Anforderungen möglichst gut erfüllen, wie in Kap. 3.3 näher spezifiziert.

3.1.1 Makroskopische Anforderungen

Die Grundlage der Anforderungsdefinition bilden die von Wachenfeld und Winner¹⁰³ in Effektivitäts- und Effizienzkriterien unterteilten Anforderungen an ein Testkonzept zur Freigabe höher automati-

¹⁰¹ Begriffsdefinition: Siehe Kap. 4.3.1.2 (Plausibilisierung).

¹⁰² Schuldt, F.: Diss., Methodischer Test automatisierter Fahrfunktionen (2017), S. 73 ff.

¹⁰³ Wachenfeld, W.; Winner, H.: Die Freigabe des autonomen Fahrens (2015), S. 447 ff.

sierten Fahrens. Darüber hinaus erfolgt die Definition von Anforderungen, welche durch die vorliegenden Randbedingungen bei Beginn der Bearbeitung sowie durch die Aufgabenstellung bestehen. Tabelle 3-1 fasst die makroskopischen Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik zusammen.

Tabelle 3-1: Makroskopische Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik¹⁰³

Makroskopische Anforderungen			
Kategorie	Nr.	Kriterium	Kurzbeschreibung
Effektivitätskriterien	1	Repräsentativ - valide	Erreichen nötiger Testabdeckung, Aufweisen minimal notwendigen Realitätsgrads, generisch erweiterbar
	2	Variierbar	Umsetzbarkeit aller definierten Testfälle ¹⁰⁴
	3	Beobachtbar	Beobachtbarkeit relevanter Einflussparameter
Effizienzkriterien	4	Ökonomisch	Schnell und kostengünstig
	5	Reproduzierbar	Nach Fehlererkennung Testbarkeit in gleichem Szenario
	6	Frühzeitig	Möglichst frühzeitig im Entwicklungsprozess
	7	Sicher	Kein Übersteigen des akzeptierten Risikos aller Testbeteiligten
Kriterien durch gegebene Randbedingungen & Aufgabenstellung	8	Integrationsfähigkeit in vorhandenes Simulationsframework	Erweiterung der Methode von Hallerbach et al. ¹⁰⁵ im gegebenen Simulationsframework
	9	Integration der Methode der funktionalen Dekomposition	Anwendung der Methode der funktionalen Dekomposition zur Reduktion des Parameterraums innerhalb der entwickelten Methodik
	10	Bestimmbarkeit des resultierenden Parameterraums & Testumfangs	Methodik muss eine Bestimmbarkeit sowohl des Parameterraums als auch des Testumfangs ermöglichen
	11	Objektive Bestimmbarkeit der Parameterraumreduktion	Reduktion des Parameterraums durch die entwickelte Methodik muss objektiv bestimmbar sein

Nachfolgend wird detailliert auf die Anforderungen eingegangen. Dabei werden etwaige Einschränkungen in Bezug auf die Erfüllbarkeit einzelner Anforderungen im Rahmen dieser Arbeit genannt sowie begründet. Da die Entwicklung der Methodik zur systematischen Auswahl logischer Szenarien sowie deren Überführung in konkrete Szenarien als Teilmenge eines kompletten Testkonzepts zur Freigabe höher automatisierter Fahrfunktionen anzusehen ist, wird die Notwendigkeit der Erfüllung einzelner Anforderungen stets in Bezug zu dieser Teilmenge gesetzt. Es wird davon ausgegangen, dass bei Erfüllen einer Anforderung durch die Methodik ein Erfüllen dieser Anforderung innerhalb eines gesamten Testkonzepts möglich ist.

¹⁰⁴ Begriffsdefinition „Testfälle“ siehe Kap. 2.1.2.3 (Konkrete Szenarien).

¹⁰⁵ Hallerbach, S. et al.: Simulation-Based Identification of Critical Scenarios (2018).

Innerhalb der Kategorie der Effektivitätskriterien ergeben sich für das Kriterium der Repräsentativität zwei Aspekte. Zum einen besteht die Forderung an die Testfallgenerierung dafür zu sorgen, dass die nötige Testabdeckung erreicht wird, zum anderen ist es erforderlich, dass die Testdurchführung den minimal notwendigen Grad an Realität aufweist. Die in dieser Arbeit entwickelte Methodik verfügt über keinen Anspruch auf Repräsentativität. Dennoch wird die Repräsentativität in der exemplarischen Anwendung im Rahmen der gegebenen Ressourcen maximiert. Zudem hat die Methodik in der Art generisch ausgeführt zu sein, dass die Möglichkeit besteht, deren Repräsentativität in der Anwendung weiter zu steigern. An die zu entwickelnde Methodik besteht die Forderung nach Variierbarkeit in dem Sinne, dass der jeweilige, durch ein logisches Szenario definierte Parameterraum die Möglichkeit bietet, alle von der Testfallgenerierung definierten Testfälle umsetzen. Im Rahmen der Arbeit ist diese Anforderung für exemplarische, logische Szenarien umzusetzen und eine Erweiterung auf eine höhere Anzahl logischer Szenarien zu ermöglichen. Die Beobachtbarkeit bezieht sich nach Definition von Wachenfeld und Winner auf die Parameter der Testdurchführung. Bezogen auf die zu entwickelnde Methodik ergibt sich die Anforderung der Beobachtbarkeit in der Form, dass alle als relevant definierten Einflussparameter der ersten, zweiten und vierten Ebene des in Kapitel 3.2.2.2 erläuterten 6-Ebenen-Modells des entsprechenden logischen Szenarios systematisch und objektiv ermittelbar sind.

Das erste Kriterium innerhalb der Effizienzkriterien wird durch die Forderung nach einer ökonomischen Methodik gebildet. Während Wachenfeld und Winner diese Forderung auf die Testdurchführung beziehen, wird die Forderung innerhalb der vorliegenden Arbeit auf die Transformation funktionaler in konkrete Szenarien bezogen. Die Methodik muss in der Lage sein alle relevanten konkreten Szenarien für den nachfolgenden Prozessschritt bereitzustellen. Zudem besteht die Forderung nach Reproduzierbarkeit an die Methodik in der Art, dass das Testobjekt im gleichen Szenario erneut dem Test unterzogen werden kann. Weiterhin wird gefordert, dass die Methode es erlaubt, möglichst früh im Entwicklungsprozess auf das Testobjekt anwendbar zu sein. Die Forderung nach Sicherheit durch die Methodik wird der Vollständigkeit halber ebenfalls erwähnt, ist im Zusammenhang mit der gegebenen Aufgabenstellung allerdings nicht als kritisch anzusehen. Dies lässt sich dadurch begründen, dass die zu entwickelnde Methode, als Teil eines gesamten Testkonzepts, vollständig in einer Simulationsumgebung abzubilden ist und somit mit keiner Gefährdung von Testbeteiligten zu rechnen ist.

Weitere Anforderungen ergeben sich durch die zu Beginn der Arbeit vorliegenden Randbedingungen. Grundvoraussetzung der Methodik ist dabei deren Integrationsfähigkeit in das bereits vorgestellte Simulationsframework von Hallerbach et al.¹⁰⁶ und die Erweiterung dessen bezüglich der Transformation funktionaler in konkrete Szenarien. Außerdem wird eine Integrationsfähigkeit der Methode der funktionalen Dekomposition in die entwickelte Methodik gefordert. Durch die Anwendung der funktionalen Dekomposition ist eine Reduktion des Parameterraums herbeizuführen. Darüber hinaus besteht die Forderung der Bestimmbarkeit des Parameterraums sowie des zugehörigen Testumfangs durch die Methodik. Überdies wird eine objektive Bestimmbarkeit der resultierenden Reduktion des Parameterraums durch die entwickelte Methodik gefordert.

¹⁰⁶ Hallerbach, S. et al.: Simulation-Based Identification of Critical Scenarios (2018).

3.1.2 Prozessschrittspezifische Anforderungen

Nachfolgend werden die prozessschrittspezifischen Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik erläutert. Die Überführung funktionaler in konkrete Szenarien lässt sich in Anlehnung an Schuldt¹⁰⁷ in die Prozessschritte *Definition relevanter funktionaler Szenarien*, *Auswahl potenzieller Einflussparameter*, *Analyse potenzieller Einflussparameter* und *Definition konkreter Szenarien* unterteilen, wobei sich für die drei letztgenannten Prozessschritte zusätzliche spezifische Anforderungen ergeben, welche in Tabelle 3-2 zusammengefasst sind.

Tabelle 3-2 : Prozessschrittspezifische Anforderungen an Methodik nach Schuldt¹⁰⁷

Prozessschrittspezifische Anforderungen			
Prozessschritt	Nr.	Kriterium	Kurzbeschreibung
Auswahl potenzieller Einflussparameter	12	Identifikation relevanter Einflussparameter	Identifikation von Parametern mit direktem oder indirektem Einfluss auf das Testobjekt
	13	Identifikation repräsentativer Wertebereiche	Wertebereiche müssen Zielumgebungen und Anwendungsszenarien des Testobjekts adäquat abbilden
Analyse potenzieller Einflussparameter	14	Bestimmung von Diskretisierungsfunktionen für wertkontinuierliche Parameter	Bestimmung der Verteilung der Diskretisierungsstufen über die identifizierten Wertebereiche der jeweiligen Parameter
	15	Bestimmung der Fehlerwahrscheinlichkeit durch Diskretisierung wertkontinuierlicher Parameter	Analyse der identifizierten Einflussparameter soll Aussage über Fehlerwahrscheinlichkeit des nicht getesteten Wertebereichs treffen
Definition konkreter Szenarien	16	Ableitung minimal erforderlicher Anzahl an konkreten Szenarien	Ableitung der minimal erforderlichen Anzahl an konkreten Szenarien zur Freigabe des Testobjekts
	17	Minimale Redundanz abgeleiteter konkreter Szenarien	Minimierung der Anzahl zu testender, identischer konkreter Szenarien
	18	Keine Notwendigkeit des Quellcodes	Ableitung konkreter Szenarien muss ohne Informationen über den Quellcode des Testobjekts möglich sein

Innerhalb des Prozessschrittes der Auswahl potenzieller Einflussparameter ergeben sich zwei zusätzliche Anforderungen. Die erste Anforderung besteht darin, dass die Auswahl in der Lage ist relevante Einflussparameter zu identifizieren. Im Kontext dieser Arbeit wird ein Einflussparameter als relevant bezeichnet, wenn dieser einen direkten oder indirekten Einfluss von außen auf das Testobjekt aufweist. Die zweite Anforderung besteht darin, dass die Auswahl repräsentative Wertebereiche für die

¹⁰⁷ Schuldt, F.: Diss., Methodischer Test automatisierter Fahrunktionen (2017), S. 81 ff.

entsprechenden Einflussparameter definiert. Nach Schuldt¹⁰⁸ ist dazu neben den Grenzwerten des Wertebereichs auch eine statistische Verteilung innerhalb des Wertebereichs abzubilden. In der vorliegenden Arbeit wird die Auswahl der relevanten Einflussparameter für die exemplarische Anwendung der Methodik für ausgewählte funktionale Szenarien, auf Basis der in Kapitel 3.2.2 erläuterten Informationsquellen, vorgenommen. Bezüglich der Auswahl repräsentativer Wertebereiche gelten die in Kapitel 3.1.1 für die Repräsentativität auf makroskopischer Ebene getätigten Aussagen äquivalent. Die Ermittlung statistischer Verteilungen innerhalb der Wertebereiche der ausgewählten Einflussparameter wird innerhalb dieser Arbeit dem Prozessschritt der Analyse potenzieller Einflussparameter zugeordnet und in Kapitel 3.2.3.2 detailliert betrachtet.

Die erste prozessschrittspezifische Anforderung an die Analyse potenzieller Einflussparameter ist die Möglichkeit der Bestimmung von Diskretisierungsfunktionen für wertkontinuierliche Parameter. Da durch diese Diskretisierung keine vollständige Testabdeckung des theoretisch unendlich großen Parameterraums erreicht werden kann, hat die Methodik in der Lage zu sein, eine Aussage über die Fehlerwahrscheinlichkeit des nicht getesteten Wertebereichs zu treffen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden Diskretisierungsfunktionen für ausgewählte Einflussparameter der ersten, zweiten und vierten Ebene des 6-Ebenen-Modells der exemplarischen funktionalen Szenarien erzeugt. Von der Methodik wird gefordert bezüglich dieses Prozessschritts die Möglichkeit zu bieten, auch für die Anwendung anderer funktionaler Szenarien erweiterbar zu sein. Bei Angaben der Fehlerwahrscheinlichkeit durch die Diskretisierung sind diese stets vor dem Hintergrund der vorherigen Ausführungen bezüglich der Repräsentativität zu interpretieren.

Die prozessschrittspezifischen Anforderungen an die Definition konkreter Szenarien stellen sich wie folgt dar. Es wird gefordert, dass die Methodik zur Überführung funktionaler in konkrete Szenarien die minimale Anzahl konkreter Szenarien an die Testdurchführung weitergibt, welche hinreichend ist, um eine Freigabe des Testobjekts zu erreichen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist diese Forderung nicht zu erfüllen, da die Frage nach der hinreichenden Anzahl konkreter Szenarien weiterhin Gegenstand der Forschung ist.¹⁰⁹ Dennoch werden bestehende Ansätze bezüglich des nötigen Testumfangs evaluiert sowie ein Ansatz zur systematischen Ableitung konkreter Szenarien, auf Basis logischer Szenarien, entwickelt. Da das wiederholte Testen identischer konkreter Szenarien mit keiner Erhöhung der Testabdeckung einhergeht, ist dieses zu vermeiden. Aus diesem Grund besteht die Forderung an die zu entwickelnde Methodik keine identischen konkreten Szenarien an die Testdurchführung weiterzuleiten. Die dritte Anforderung innerhalb der Definition konkreter Szenarien wird dadurch gebildet, dass konkrete Szenarien ohne Informationen über den Quellcode des Testobjekts ermittelbar sind. Dies ist in Bezug auf die vorliegende Aufgabenstellung hervorzuheben, da zum Zeitpunkt der Bearbeitung kein Modell der zu untersuchenden Fahrfunktion vorliegt und dies den generischen Charakter der Methodik fördert. Anzumerken ist, dass sämtliche genannte Anforderungen zur Definition konkreter Szenarien direkten Einfluss auf die makroskopische Forderung nach einer ökonomischen Methodik haben.

¹⁰⁸ Schuldt, F.: Diss., Methodischer Test automatisierter Fahrunktionen (2017), S. 86 ff.

¹⁰⁹ Amersbach, C.; Winner, H.: Required and Feasible Test Coverage (2019).

3.2 Stand der Technik

Innerhalb dieses Kapitels wird der Stand der Technik im Bereich der Überführung funktionaler in konkrete Szenarien vorgestellt. Die Überführung lässt sich in Anlehnung an Schuldt in die Prozessschritte *Definition relevanter funktionaler Szenarien*, *Auswahl potenzieller Einflussparameter*, *Analyse potenzieller Einflussparameter* und *Definition konkreter Szenarien* unterteilen.¹¹⁰ Es werden stets Informationsquellen und Methoden zur Bewältigung des entsprechenden Prozessschritts genannt und erläutert sowie deren Anwendung in bisherigen Veröffentlichungen zusammengefasst. Da der Schwerpunkt dieser Arbeit auf den Prozessschritten ab der Auswahl potenzieller Einflussparameter bis zur Definition konkreter Szenarien liegt, werden für diese zusätzlich spezifische Vor- und Nachteile der Informationsquellen und Methoden in Bezug auf die Erfüllbarkeit der in Kapitel 3.1 definierten Anforderungen genannt.

3.2.1 Definition relevanter funktionaler Szenarien

Die Definition relevanter funktionaler Szenarien bildet den ersten Prozessschritt innerhalb der Methodik. Zur Definition dieser sprachlich gefassten Szenarien stehen mehrere Informationsquellen zur Verfügung, welche nachfolgend beschrieben werden.

3.2.1.1 Szenarienkatalog PEGASUS

Innerhalb mehrerer Veröffentlichungen, welche im Rahmen des PEGASUS-Projekts entstanden sind, werden relevante funktionale Szenarien für den Anwendungsfall des Autobahn-Chauffeurs beschrieben.^{111,112,113} Wird die Vollständigkeit der funktionalen Szenarien für diesen Anwendungsfall vorausgesetzt, lässt sich für den Anwendungsfall *Traffic-Jam-Chauffeur* (TJC) die Menge potenzieller funktionaler Szenarien extrahieren. Darüber hinaus wurde im PEGASUS-Projekt eine Testspezifikationsdatenbank erstellt. Diese soll in der Lage sein Daten unterschiedlicher Eingangsquellen, wie beispielsweise aus Fahrversuchen, der Felderprobung oder der Verkehrssimulation, in einer einheitlichen Prozesskette, vordefinierten logischen Szenarien, in Form von Häufigkeitsverteilungen entsprechender Einflussparameter, zuzuordnen.¹¹⁴ Im Rahmen dieser Arbeit kann nicht auf die Datenbank zugegriffen werden.

3.2.1.2 Bestehende Veröffentlichungen

Außerhalb des Rahmens von PEGASUS existieren weitere Veröffentlichungen, innerhalb welcher funktionale Szenarien zur Absicherung höher automatisierter Fahrfunktionen definiert werden.^{115,116}

¹¹⁰ Schuldt, F.: Diss., Methodischer Test automatisierter Fahrfunktionen (2017), S. 81 ff.

¹¹¹ Amersbach, C.; Winner, H.: Funktionale Dekomposition (2018), S. 7.

¹¹² BMWi: PEGASUS Method (2019), S. 15 f.

¹¹³ Aouini, R.: Masterthesis, Reduktionspotential funktionale Dekomposition (2018), S. 25 f.

¹¹⁴ Puetz, A. et al.: Database of relevant traffic scenarios (2017).

¹¹⁵ Gao, F. et al.: A test scenario automatic generation strategy (2019), S. 8 f.

¹¹⁶ ISO: 21448:2019 Road Vehicles -- Safety of the intended functionality (2019), Annex F.

Diese können einerseits die Menge der, für die betrachtete Fahrfunktion in Frage kommenden, funktionalen Szenarien erhöhen. Andererseits können diese funktionalen Szenarien einen Hinweis auf die Vollständigkeit der, im Rahmen von PEGASUS betrachteten, funktionalen Szenarien geben.

3.2.1.3 Funktionsspezifikation des Testobjekts

Die Funktionsspezifikation des Testobjekts kann sowohl zur Definition relevanter funktionaler Szenarien als auch zur Auswahl potenzieller Einflussparameter innerhalb der Methodik verwendet werden. Nachfolgend wird die Anwendung in Bezug auf die Definition relevanter funktionaler Szenarien vorgestellt.

Innerhalb der Funktionsspezifikation wird das gewünschte Verhalten in den Anwendungsszenarien des Testobjekts festgelegt. Unter anderem werden Aspekte von Szenen beschrieben, welche für die betrachtete Fahrfunktion relevant sind. Mit diesem Wissen lassen sich wiederum Szenen ausschließen, welche für die betrachtete Fahrfunktion irrelevant sind. In Hinblick auf die Definition relevanter funktionaler Szenarien kann hierdurch, beispielsweise für den Anwendungsfall des Autobahn-Chauffeurs und dessen als Autobahn definierte Zielumgebung, eine Reduktion potenziell relevanter funktionaler Szenarien durchgeführt werden. In diesem Fall könnten beispielsweise Szenarien im urbanen Umfeld wie das Kreuzungsszenario außer Acht gelassen werden. Die Herausforderung bei der Nutzung der Funktionsspezifikation als Informationsquelle liegt vor allem in deren Vollständigkeit.¹¹⁷ Auf diese Problematik wird in Kapitel 3.2.2.1 nochmals detaillierter eingegangen.

3.2.2 Auswahl potenzieller Einflussparameter

Den Schwerpunkt dieser Arbeit bildet ein Ansatz zur systematischen Auswahl und Analyse potenzieller Einflussparameter, dessen Grundlage die, im vorherigen Prozessschritt, definierten relevanten funktionalen Szenarien darstellen. Wie bereits in Kapitel 1.1 dargelegt, findet diese Thematik in bestehenden Testkonzepten wenig Beachtung und stellt eine offene Forschungsfrage dar. Dabei basiert die Auswahl und Analyse entweder auf Expertenwissen oder für eine Anwendbarkeit der vorgestellten Ansätze werden bereits diskrete Eingangsparameter benötigt.^{118,119a} Es folgt eine Erläuterung möglicher Informationsquellen zur Auswahl potenzieller Einflussparameter auf Basis der Veröffentlichung von Schuldt.^{119b}

3.2.2.1 Funktionsspezifikation des Testobjekts

Wie bereits im ersten Prozessschritt, kann die Funktionsspezifikation auch nach Auswahl relevanter funktionaler Szenarien zur Auswahl potenzieller Einflussparameter als Informationsquelle dienen. Bezogen auf die beispielhafte Betrachtung einer automatisierten Fahrfunktion für Stausituationen führen Einschränkungen im Funktionsumfang zur Möglichkeit nicht relevante Einflussparameter für

¹¹⁷ Reschka, A.: Diss., Fertigkeiten- und Fähigkeitsgraphen (2017), S. 98 f.

¹¹⁸ Kacker, R. N. et al.: Combinatorial testing for software (2013), S. 3750.

¹¹⁹ Schuldt, F.: Diss., Methodischer Test automatisierter Fahrfunktionen (2017). a: S. 89; b: S. 90 ff.; c: S. 109 ff.

ein logisches Szenario zu identifizieren. Die Einschränkung auf einen definierten Geschwindigkeitsbereich führt beispielsweise zur Beschränkung des Wertebereichs des entsprechenden Parameters innerhalb des logischen Szenarios. Es sei auf die Wichtigkeit einer sorgfältig erarbeiteten Funktionsspezifikation hingewiesen, welche in mehreren Veröffentlichungen detailliert diskutiert wird.^{117, 119c} Die Erfüllung der in Kapitel 3.1 genannten Anforderungen hängen signifikant von der Qualität der Funktionsspezifikation ab. So kann es durch eine umfangreich ausgearbeitete Funktionsspezifikation einerseits möglich sein sowohl Einflussparameter als auch deren repräsentative Wertebereiche zu identifizieren. Andererseits kann die Nutzung einer fehlerhaften Funktionsspezifikation zu einem Großteil schwerer Fehler des Testobjekts führen.¹²⁰

3.2.2.2 6-Ebenen-Modell zur Beschreibung von Szenarien

Das 6-Ebenen-Modell zur Beschreibung von Szenarien, welches ursprünglich als 4-Ebenen-Modell von Schuldt^{119c} definiert wurde, erfuhr durch Bagschik et al.¹²¹ eine Erweiterung um eine fünfte Ebene. Es dient der systematischen Beschreibung und Darstellung von Szenarien automatisierter Fahrfunktionen. Im Rahmen des PEGASUS-Projekts wurde das Modell nochmals um eine sechste Ebene erweitert. Abbildung 3-1 zeigt die verschiedenen unabhängigen Ebenen sowie zugehörige Eigenschaften und Elemente der jeweiligen Ebene auf. Als generisches Modell kann es bei mehrfacher Verwendung sukzessive erweitert werden und so als Informationsspeicher für die ein Szenario beschreibenden Parameter dienen. Zudem kann es frühzeitig in den Entwicklungsprozess eingebunden werden und eine vollständig beschriebene Szene kann beliebig oft reproduziert werden.¹²² Da ein Modell die Realität jedoch niemals vollständig abbilden kann, ist das 6-Ebenen-Modell nur als eines mehrerer Werkzeuge zur Auswahl von Einflussparametern anzusehen.

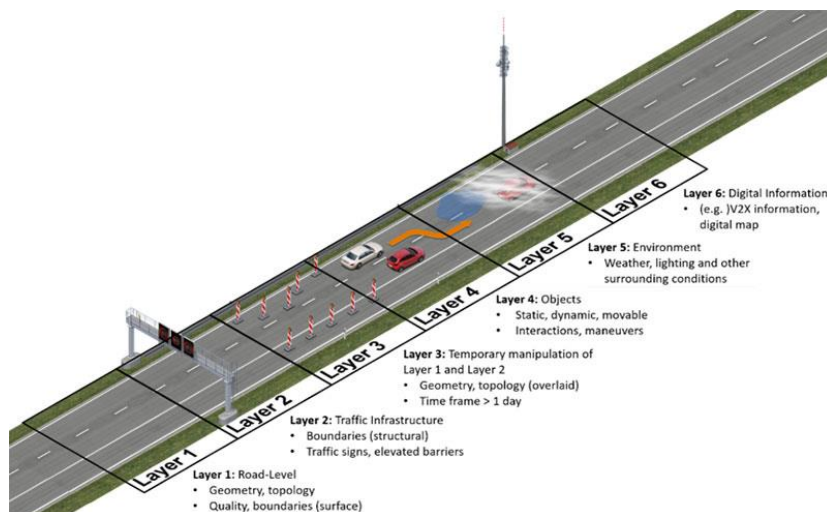


Abbildung 3-1: 6-Ebenen-Modell zur Strukturierung von Szenarien¹²³ nach Bagschik et al.¹²¹ basierend auf Schuldt^{124a}

¹²⁰ Fleischmann, A.: Diss., Modellbasierte Formalisierung von Anforderungen (2008).

¹²¹ Bagschik, G. et al.: Wissensbasierte Szenariengenerierung (2018), S. 4 ff.

¹²² Bickel, J.: Masterthesis, Methode zur Identifikation, Diskretisierung und Zuordnung von Einflussparametern (2019), S. 41.

¹²³ BMWi: Scenario Description and Knowledge-based Scenario Generation (2019).

¹²⁴ Schuldt, F.: Diss., Methodischer Test automatisierter Fahrfunktionen (2017). a: S. 109 ff.; b: S. 91.

3.2.2.3 Normen und Richtlinien

In Deutschland¹²⁵ sowie in einigen anderen Ländern, wie beispielsweise in Australien oder in den Vereinigten Staaten von Amerika, existieren Normen und Richtlinien für die Anlage von Straßen. Diese können in Anlehnung an das vorgestellte 6-Ebenen-Modell nutzbringend für die Auswahl von Parametern der Ebenen eins bis drei – also für stationäre Elemente der Straße sowie deren temporäre Veränderungen – eingesetzt werden. Durch Normen und Richtlinien ist es möglich, Grenzwerte der Wertebereiche der zugehörigen Parameter zu definieren. Eigenschaften und Wertebereiche dynamischer Elemente aus Ebene vier sind nicht direkt bestimmbar, da nicht alle Verkehrsteilnehmer normative Vorgaben wie die Geschwindigkeitsbegrenzung einhalten. Hinzukommt, dass dadurch vor allem pathologische Fälle, die häufig aus nicht normativem Verhalten resultieren, ignoriert würden. Deshalb werden Normen und Richtlinien innerhalb dieser Arbeit nur für stationäre Elemente betrachtet. Doch auch in Bezug auf die Verwendung von Normen und Richtlinien für Eigenschaften stationärer Elemente sind mehrere Einschränkungen zu nennen. Aufgrund der Tatsache, dass diese Normen und Richtlinien nicht für die Gesamtheit bestehender Straßen existieren, gilt die Absicherung unter Bezugnahme auf diese auch nur in solchen Bereichen, die nach entsprechender Norm angelegt sind. Zudem kann es auch in Ländern, in welchen die Norm gilt, zu Abweichungen zwischen dem durch die Norm definierten Soll-Zustand und dem Ist-Zustand in der Realität kommen.^{124b}

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Normen und Richtlinien anwendungsfallspezifisch sowohl zur Erfüllung der makroskopischen als auch der prozessschrittspezifischen Anforderungen für Einflussparameter der ersten bis dritten Ebene des 6-Ebenen-Modells beitragen. Aus den zuvor genannten Gründen ist diese Anforderungserfüllung jedoch nicht generalisierbar, weshalb Normen und Richtlinien nur als eines mehrerer Werkzeuge zur Auswahl potenzieller Einflussparameter anzusehen sind.

3.2.2.4 Fahrmanöver & Fahrzeugkataloge

Fahrmanöver und Fahrzeugkataloge bilden eine weitere Informationsquelle zur Auswahl potenzieller Einflussparameter. In der Veröffentlichung von Tölle¹²⁶ werden neun Fahrmanöver in einer Basismenge von Manövern definiert, welche von einem automatisierten Fahrzeug beherrscht werden müssen. Ist beispielsweise das Fahrmanöver *Abbiegen* Teil des zu betrachtenden funktionalen Szenarios, kann dies einen Hinweis darauf geben, dass Kenngrößen der Querdynamik wie beispielsweise der Lenkwinkel als Einflussparameter des Szenarios in Frage kommen. Fahrzeugkataloge ermöglichen die Definition von Parametern und Wertebereichen der vierten Ebene des 6-Ebenen-Modells, also der beweglichen Objekte. In Form von technischen Datenblättern können so geometrische und dynamische Kenngrößen von Fahrzeugen festgelegt sowie deren Wertebereiche bestimmt werden. Als Beispiel einer dynamischen Kenngröße sei das maximale Beschleunigungsvermögen einer bestimmten Fahrzeugklasse genannt.

¹²⁵ FGSV: Richtlinien für die Anlage von Autobahnen.

¹²⁶ Tölle, W.: Ein Fahrmanöverkonzept für einen maschinellen Kopiloten (1996).

3.2.2.5 Unfallanalysen

Unfallanalysen wie jene des statistischen Bundesamtes¹²⁷ zeigen Szenarien auf, bei welchen das Fehlverhalten von Menschen zu Verkehrsunfällen führt. Dies gibt einen direkten Hinweis auf potenzielle Einflussparameter kritischer Szenarien. Zudem ist es möglich für die aufgeführten Szenarien Wertebereiche und Diskretisierungsstufen abzuleiten. Für die Nutzung der auf diese Weise gewonnenen Informationen ergeben sich jedoch zwei erhebliche Einschränkungen. Zum einen ist vor einer statistisch signifikanten Marktdurchdringung höher automatisierter Fahrzeuge nicht klar, inwiefern eine Übertragbarkeit kritischer Szenarien zwischen durch Menschen gesteuerten Fahrzeugen und höher automatisierten Fahrzeugen gegeben ist. Diese von Winner als *Dark Matter Problem* angeführte Herausforderung macht klar, dass für den Menschen kritische Szenarien unter Umständen unkritisch für höher automatisierte Fahrzeuge sind und bisherige, für den Menschen unkritische Szenarien, hingegen kritisch für höher automatisierte Fahrzeuge sind. Würden zur Absicherung lediglich die für den Menschen kritischen Szenarien betrachtet, könne nicht gewährleistet werden, dass damit einhergehend auch jene Szenarien getestet würden, welche für höher automatisierte Fahrzeuge kritisch sind.¹²⁸ Die zweite Einschränkung in Bezug auf Unfallanalysen als Informationsquelle ergibt sich aus der Tatsache, dass lediglich Szenarien erfasst werden, die zu tatsächlichen Unfällen geführt haben. Die zur Absicherung höher automatisierter Fahrfunktionen besonders relevanten kritischen Szenarien, welche in diesem Zusammenhang als Beinaheunfälle aufzufassen sind, werden außer Acht gelassen.

3.2.2.6 Expertenwissen

Aufgrund langjähriger Erfahrungen bei der Entwicklung von Systemen zur Realisierung automatisierter Fahrfunktionen sind Experten befähigt konkrete Szenarien zu definieren, welche als besonders kritisch in Bezug auf die Erfüllung der gewünschten Fahrfunktion anzusehen sind. Daraus resultiert die Möglichkeit potenziell relevante, das entsprechende Szenario beschreibende, Parameter zu identifizieren. Darüber hinaus können Experten oftmals eine Aussage über fehlersensitive Diskretisierungsstufen der genannten Szenarien treffen. Jedoch kann Expertenwissen nach Eltaher¹²⁹ in den meisten Fällen nur intuitiv beschrieben werden. Eltaher stellt darüber hinaus eine Methode zur Objektivierung von Expertenwissen für den Anwendungsfall eines Infotainmentsystems vor, welche nach bisherigem Kenntnisstand allerdings nicht auf das Testen höher automatisierter Fahrfunktionen übertragbar ist. Die Objektivierung für diesen Anwendungsfall wäre für die so genannten pathologischen Fälle, das heißt Szenarien mit sehr geringer Auftretenswahrscheinlichkeit, von besonderem Interesse, da diesen Szenarien bei statistischer Auswertung prinzipbedingt weniger Beachtung zukommt als solchen mit höherer Auftretenswahrscheinlichkeit.

¹²⁷ Destatis: Verkehrsunfälle (2018), S. 49 ff.

¹²⁸ Winner, H. et al.: Safety Assurance for Highly Automated Driving (2016), S. 11 ff.

¹²⁹ Eltaher, A.: Diss., Human-Like Test Systems (2013).

3.2.3 Analyse potenzieller Einflussparameter

Den Kern der Methodik zur systematischen Ableitung logischer Szenarien sowie deren Überführung in konkrete Szenarien bildet die Analyse potenzieller Einflussparameter. Auf Basis der im vorherigen Teilkapitel 3.2.2 vorgestellten Informationsquellen bilden die, für ein funktionales Szenario ausgewählten, potenziellen Einflussparameter den Eingang für den Prozessschritt der Analyse dieser Einflussparameter. In der einschlägigen Literatur bestehen verschiedene Ansätze zur Umsetzung dieses Prozessschrittes, welche nachfolgend einer näheren Betrachtung unterzogen werden.

3.2.3.1 Sensitivitätsanalyse

Eine mögliche Methode zur Analyse potenzieller Einflussparameter ist die Sensitivitätsanalyse. Nach Saltelli¹³⁰ ist diese als Untersuchung definiert, wie sich die Unsicherheit einer Modellausgangsgröße in die verschiedenen Quellen von Unsicherheiten der Modelleingangsgrößen aufteilen lässt. Alle der, von Saltelli genannten, häufigsten vier Anwendungsfälle einer Sensitivitätsanalyse scheinen für die vorliegende Problemstellung relevant. Der erste genannte Anwendungsfall ist die Priorisierung von Parametern, mit welcher die Parameter mit dem größten Einfluss auf eine Ausgangsgröße identifiziert und entsprechend des jeweiligen Einflusses eingestuft werden können. Der zweite Anwendungsfall wird durch die Identifizierung nicht einflussreicher Parameter gebildet, für welche sich bei Variation innerhalb ihres Wertebereichs keine signifikante Änderung der Modellausgangsgröße beobachten lässt. Der dritte genannte Anwendungsfall ist die Absenkung der Ausgangsvarianz unter einen definierten Grenzwert. Den abschließend beschriebenen Anwendungsfall stellt die Untersuchung der Beziehung zwischen Eingangs- und Ausgangswerten dar.¹³¹

Unter den verschiedenen Methoden der Sensitivitätsanalyse nimmt der zu den globalen Methoden gehörende erweiterte Fourier-Amplituden-Sensitivitätstest (eFAST) eine Sonderstellung ein. Mit diesem ist es möglich neben dem als Haupteffekt bezeichneten Einfluss eines Parameters auf die Modellausgangsgröße zusätzlich die Summe von dessen Einflüssen auf die restlichen Parameter, den so genannten Interaktionseffekt, zu quantifizieren.¹³²

Als größte Herausforderung für die Anwendung dieser Methode ist die bereits in Kap. 1.1 angesprochene Problematik des Fehlens eines allgemein anerkannten metrischen Validitätskriteriums¹³³ für die Güte einer höher automatisierten Fahrfunktion oder für die Kritikalität eines Szenarios anzusehen. Dieses würde die jeweilige Modellausgangsgröße bilden. Mit Kenntnis eines solchen Kriteriums könnten in Abhängigkeit der Sensitivitäten der ausgewählten Einflussparameter, in Form von Haupt- und Interaktionseffekten, Diskretisierungsfunktionen objektiv abgeleitet werden. Amersbach¹³⁴ führt in diesem Zusammenhang den Begriff einer Volumenzelle ein, innerhalb derer mehrere konkrete Szenarien als identisch angesehen werden können. Der als Zellvolumen aufzufassende Grenzwert,

¹³⁰ Saltelli, A.: Sensitivity analysis of scientific models (2007), S. 1.

¹³¹ Wohlrab, S.: Masterthesis, Einflussanalyse von Parametervariationen am Fahrzeug (2016), S. 11 ff.

¹³² Saltelli, A. et al.: A Quantitative Model-Independent Method for Global Sensitivity Analysis of Model Output (1999), S. 44 ff.

¹³³ Begriffserklärung siehe Viehof, M.: Diss., Objektive Qualitätsbewertung von Fahrdynamiksimulationen (2018), S. 54 f.

¹³⁴ Amersbach, C.; Winner, H.: Required and Feasible Test Coverage (2019), S. 4.

innerhalb dessen die Parameterräume zweier konkreter Szenarien als identisch angesehen werden können, ließe sich mit einer Sensitivitätsanalyse quantifizieren und so die Anzahl relevanter konkreter Szenarien reduzieren. Eine weitere Herausforderung in Bezug auf die Anwendung der Methode der Sensitivitätsanalyse ist dadurch gegeben, dass zur Quantifizierung der oben erläuterten Effekte das Modell der betrachteten Fahrfunktion vorliegen muss, was im Rahmen dieser Arbeit nicht der Fall ist.

3.2.3.2 Statistische Auswertungen

Eine weitere Methode, welche zur Analyse potenzieller Einflussparameter herangezogen werden kann, ist die statistische Auswertung. Für stationäre und bewegliche Elemente können, auf Basis unterschiedlicher Quellen, Parameter ausgewertet werden, um sowohl deren Wertebereiche als auch deren Auftretenswahrscheinlichkeiten innerhalb des entsprechenden Wertebereichs zu identifizieren.¹³⁵ Auf Grundlage ermittelter Wahrscheinlichkeitsverteilungen können zudem Diskretisierungsstufen abgeleitet werden, wie von Olivares et al.¹³⁶ für den Parameter der Kurvenkrümmung aufgezeigt. Huang et al.¹³⁷ stellen den Ansatz der so genannten beschleunigten Auswertung vor, welcher, basierend auf statistischen Auswertungen von Realfahrdaten, nach Angabe der Autoren das Potenzial aufweist die Anzahl benötigter Testkilometer um den Faktor von bis zu 10^5 zu reduzieren. Darüber hinaus können durch Ausreißer innerhalb der Auswertung pathologische Fälle aufgedeckt werden.

Quellen für die Auswertung stationärer Parameter, wie beispielsweise die Kurvenkrümmung oder die Fahrstreifenbreite, sind zum Beispiel Online-Karten wie OpenStreetMap¹³⁸ oder frei zugängliches Kartenmaterial im OpenDrive-Format. Dabei ist anzumerken, dass die Qualität der Auswertung direkt von der Qualität der zugrunde liegenden Daten abhängt. In Abbildung 3-2 ist links die Kerndichteschätzung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Kurvenkrümmung, auf Basis von Autobahnen im regionalen Umfeld von München, durch Olivares et al. dargestellt. Das Histogramm im rechten Teil der Abbildung zeigt die statistische Auswertung der Verteilung von auftretenden Kurvenradien der deutschen Autobahnen 1-9 durch Schuldt, basierend auf OpenStreetMap. Zur Plausibilisierung der Wertebereiche verschiedener Parameter bei statistischer Auswertung eines Straßennetzwerks sind wiederum Normen und Richtlinien nutzbar, in welchen beispielsweise für Autobahnen die einzuhaltenden Fahrstreifenbreiten vorgegeben sind. Für die statistische Auswertung von Einflussparametern der Objects Ebene des 6-Ebenen-Modells werden in der Literatur häufig Messfahrten im Straßenverkehr genannt, welche sowohl zeit- als auch kostenintensiv sind.

Sowohl für die Auswertung der stationären Elemente als auch für die beweglichen Elemente ergibt sich die Herausforderung einer repräsentativen Stichprobe. Repräsentativität ist dann gegeben, wenn

¹³⁵ Schuldt, F.: Diss., Methodischer Test automatisierter Fahrunktionen (2017), S. 94 f.

¹³⁶ Prialé Olivares, S. et al.: Virtual Stochastic Testing (2016).

¹³⁷ Z. Huang et al.: Evaluation of automated vehicles (2017).

¹³⁸ OpenStreetMap.

die Stichprobe die innere Struktur und die Charakteristika einer statistischen Grundgesamtheit adäquat abbildet.¹³⁹ Bezogen auf die statistische Auswertung von Straßennetzwerken ergeben sich die Herausforderungen, dass nur solche Straßen Teil der Stichprobe sind, welche aktuell existieren und zudem erfasst wurden. Bezogen auf die statistische Auswertung von beweglichen Elementen bestehen ähnliche Herausforderungen. Einerseits besteht durch eine Messfahrt für den Beobachter jederzeit nur eine subjektive Sicht einer Szene¹⁴⁰ und es ist nur eine Teilmenge von deren Gesamtdynamik erfassbar. Andererseits sind statistische Verteilungen aufgezeichneter Parameter des heutigen Verkehrs nur bedingt nutzbar, da sich menschliche Fahrzeugführende potenziell anders verhalten als höher automatisierte Fahrzeuge.¹⁴¹ Die Überführung der Messfahrten in die Simulation in Form von Verkehrs- und Fahrdynamiksimulationen stellt dabei eine vielversprechende Alternative dar. Dies lässt sich dadurch begründen, dass die simulative Umsetzung typischerweise weniger zeit- und kostenintensiv ist und zudem eine objektive Sicht einer Szene erlaubt.¹⁴⁰ Darüber hinaus können Parameter, welche das Fahrverhalten beschreiben, variiert werden. Auf diese Weise lässt sich Verkehr erzeugen, welcher einen zukünftigen Zustand mit signifikanter Durchdringung höher automatisierter Fahrzeuge modelliert.

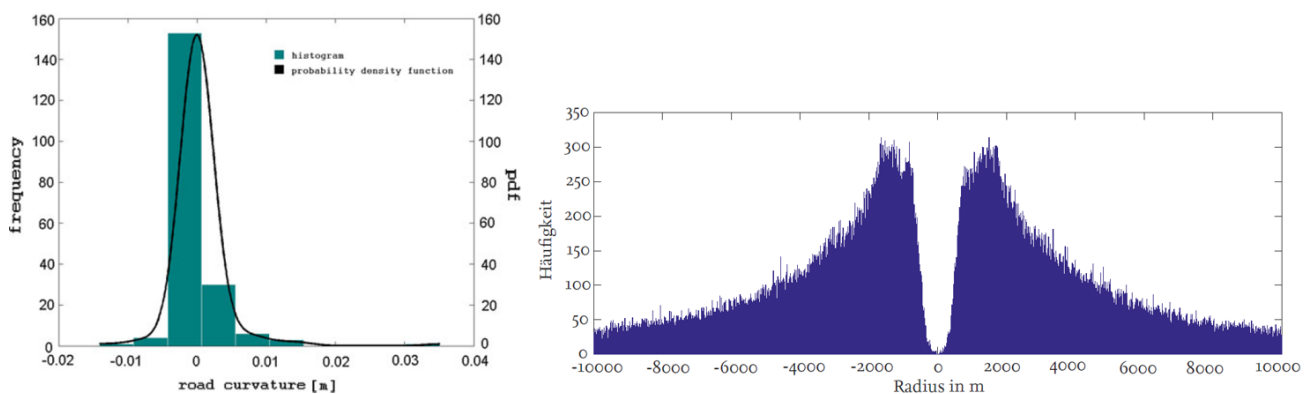


Abbildung 3-2: Kerndichteschätzung Kurvenkrümmung (links)¹³⁶ & Auswertung Kurvenradien aus OpenStreetMap (rechts)¹³⁵

3.2.3.3 Optimierungsalgorithmen

Optimierungsalgorithmen lassen sich ebenfalls zur Analyse potenzieller Einflussparameter heranziehen. Diese variieren die Eingangsparameter einer Kostenfunktion in der Weise, dass die Kostenfunktion minimiert oder maximiert wird. Ein Beispiel zur Formulierung eines solchen Optimierungsproblems in Bezug auf die Kritikalität eines Szenarios, basierend auf Verkehrsmetriken, zeigt die Veröffentlichung von Hallerbach et al.¹⁴² auf. Darüber hinaus bestehen weitere Veröffentlichungen, welche Optimierungsalgorithmen für den Test mechatronischer Systeme von Fahrzeugen heranziehen.^{143, 144a}

¹³⁹ Eckstein, P. P.: Statistik für Wirtschaftswissenschaftler (2014), S. 16.

¹⁴⁰ Ulbrich, S. et al.: Defining Scene, Situation and Scenario (2015), S. 1 ff.

¹⁴¹ Amersbach, C.; Winner, H.: Required and Feasible Test Coverage (2019), S. 4.

¹⁴² Hallerbach, S. et al.: Simulation-Based Identification of Critical Scenarios (2018), S. 8 ff.

¹⁴³ Kruse, P. M.: A Highly Configurable Test System (2009).

¹⁴⁴ Lindlar, F.: Diss., Modellbasierter evolutionärer Funktionstest (2012). a: - ; b: S. 7.

Ein Vorteil der Optimierungsalgorithmen ist durch die implizite Berechnung von Diskretisierungsstufen durch den Algorithmus selbst begründet. Auf Basis der Kostenfunktion können so Diskretisierungsstufen definiert werden, für welche das Testobjekt das beste oder schlechteste Ergebnis liefert.

Die größte Herausforderung in Bezug auf die vorliegende Aufgabenstellung stellt die Definition einer solchen Kostenfunktion dar. Die Definition wäre möglich, wenn eine anerkannte Metrik zur Definition der Kritikalität eines konkreten Szenarios vorläge, da die Kostenfunktion in der Lage zu sein hat das Ergebnis jedes Testfalls einem Zahlenwert zuzuordnen.^{144b}

3.2.3.4 Expertenwissen

Neben der der Auswahl potenzieller Einflussparameter kann das Wissen von Experten auch bei deren Analyse genutzt werden. Durch umfangreiche Erfahrungen von Experten mit dem Testobjekt können diese oftmals kritische Wertebereiche und Diskretisierungsstufen abschätzen, bei welchen mit einem Fehlverhalten zu rechnen ist.¹⁴⁵ Durch das bereits in Kapitel 3.2.2.6 erläuterte Fehlen einer Methodik zur Objektivierung von Expertenwissen in Bezug auf höher automatisierte Fahrfunktionen kann das Expertenwissen allerdings nur als zusätzliche Informationsquelle angesehen werden, da in der vorliegenden Arbeit vor allem die systematische und objektive Generierung logischer Szenarien im Vordergrund steht.

3.2.4 Definition konkreter Szenarien

Die Definition konkreter Szenarien bildet den letzten Prozessschritt innerhalb der entwickelten Methodik. Die Basis dieses Prozessschrittes sind die, in Form von Parameterbereichen im Zustandsraum vorliegenden, logischen Szenarien. Durch systematische Ableitung definierter Konfigurationen von Werten der vorliegenden Einflussparameter werden konkrete Szenarien definiert, welche die Grundlage ausführbarer Testfälle darstellen.

Die grundsätzliche Herausforderung der Überführung logischer Szenarien in konkrete Szenarien stellt die, bereits in Kap. 1.1 eingeführte, Parameterraumexplosion dar. So führt ein logisches Szenario, bestehend aus N Parametern $(p_1, \dots, p_i, \dots, p_N)$ mit jeweils v_i Instanzen, wie aus Formel (3-1) ersichtlich, zu S_N konkreten Szenarien.

$$S_N = \prod_{i=1}^N v_i \quad (3-1)$$

Hierbei liegt die Annahme einer perfekt effizienten Testfallableitung, in welcher keine redundanten Szenarien enthalten sind, zu Grunde.¹⁴⁶ Bei einer Erhöhung der Parameter oder Instanzen wächst S_N

¹⁴⁵ Schuld, F.: Diss., Methodischer Test automatisierter Fahrfunktionen (2017), S. 95.

¹⁴⁶ Amersbach, C.; Winner, H.: Funktionale Dekomposition (2018), S. 3–5.

stark progressiv an. Dies führt für das funktionale Szenario „Folgefahrt“, bezogen auf den Anwendungsfall des Autobahn-Chauffeurs, zu ca. 10^{18} konkreten Szenarien.¹⁴⁷ Da für den jeweiligen Anwendungsfall der betrachteten Fahrfunktion eine Vielzahl funktionaler Szenarien zu testen ist, erhöht sich die Anzahl der zu betrachteten, theoretisch möglichen, konkreten Szenarien zusätzlich. Ein erschöpfender Test in Form des Testens jeder möglichen Parameterkombination ist aus Zeit- und Kostengründen nicht möglich.¹⁴⁸

3.2.4.1 Kombinatorik

Allgemein beschäftigt sich die Kombinatorik mit Problemen des Auswählens und/oder Anordnens von Elementen aus einer vorgegebenen endlichen Menge von Elementen.¹⁴⁹ Bei vorliegender Diskretisierung der relevanten Einflussparameter eines logischen Szenarios hat die Definition konkreter Szenarien ebenfalls aus einer endlichen Menge von Parametern auf systematische Weise definierte Parameterkonfigurationen abzuleiten. Dies führt zu der Annahme, dass sich Kombinatorik grundsätzlich zur Definition konkreter Szenarien eignet, insofern bereits diskrete Eingangsparameter vorliegen.

Robinson-Mallet et al.¹⁵⁰ empfehlen für den Test von Fahrerassistenzsystemen im Kontext der ISO 26262 ebenfalls die Verwendung von Kombinatorik, in Verbindung mit einer vorgelagerten Äquivalenzklassenbildung und Grenzwertanalyse, welche innerhalb dieses Kapitels erläutert werden. Nach Schuldt¹⁵¹ bietet die Kombinatorik zudem das Potenzial die Anzahl redundanter konkreter Szenarien zu minimieren, da eine Semantik zwischen Einflussparametern implementierbar ist. In der Veröffentlichung von Arcuri und Briand¹⁵² werden kombinatorische Ansätze mit randomisierenden Algorithmen im Hinblick auf das Aufdecken von Interaktionsfehlern komplexer Systeme verglichen. Es zeigt sich, dass randomisierte Algorithmen bei steigender Parameteranzahl prinzipiell in der Lage sind kombinatorische Ansätze zu übertreffen. Bestehen allerdings Abhängigkeiten verschiedener Einflussparameter, wie für höher automatisierte Fahrfunktionen der Fall – beispielsweise besteht eine Abhängigkeit zwischen der Art des Niederschlags und dem Kraftschlussbeiwert – können kombinatorische Ansätze randomisierte Algorithmen übertreffen. Dies ist der Fall, da kombinatorische Ansätze die Möglichkeit bieten diese Abhängigkeiten zu berücksichtigen. Beide Ansätze haben gemein, dass entweder die Anzahl zu erzeugender konkreter Szenarien oder ein Kriterium der Testabdeckung vorgegeben werden muss.¹⁵³

Grindal et al.¹⁵⁴ strukturieren existierende Ansätze der Kombinatorik und erläutern diese. Aufgrund der Forderung nach Reproduzierbarkeit sind für die vorliegende Aufgabenstellung nur deterministische Strategien der Kombinatorik zu betrachten. Innerhalb dieser wird die *t*-weise Testabdeckung

¹⁴⁷ Amersbach, C.; Winner, H.: Required and Feasible Test Coverage (2019), S. 2.

¹⁴⁸ Sommerville, I.: Software engineering (2011), S. 539.

¹⁴⁹ Bourier, G.: Wahrscheinlichkeitsrechnung und schließende Statistik (2013), S. 71.

¹⁵⁰ Robinson-Mallett, I. C. et al.: Integration und Validation von Produktlinien für FAS (2010).

¹⁵¹ Schuldt, F.: Diss., Methodischer Test automatisierter Fahrfunktionen (2017), S. 109.

¹⁵² Arcuri, A.; Briand, L.: Probability of Interaction Fault Detection (2012), S. 1090 ff.

¹⁵³ Amersbach, C.; Winner, H.: Required and Feasible Test Coverage (2019), S. 2.

¹⁵⁴ Grindal, M. et al.: Combination testing strategies (2005).

definiert, welche als Verallgemeinerung der paarweisen Testabdeckung anzusehen ist. Die t -weise Testabdeckung erfordert jede mögliche Kombination der Instanzen v_i von t Parametern innerhalb eines Testfalls der Testsuite. Der zugehörige Testumfang wird durch die Anzahl konkreter Szenarien einer Testsuite bei gegebener Testabdeckung definiert. Bei N vorliegenden Parametern entspricht die N -weise Testabdeckung einem erschöpfenden beziehungsweise vollfaktoriellen¹⁵⁵ Test. Amersbach und Winner¹⁵⁶ übertragen diese Strategie auf die Absicherung höher automatisierter Fahrfunktionen, deren N Einflussparameter $(p_1, \dots, p_i, \dots, p_N)$ typischerweise verschieden viele Instanzen v_i aufweisen. Daraus resultiert die in Formel (3-2) beschriebene Anzahl konkreter Szenarien S_t bei t -weiser Testabdeckung für den allgemeinen Fall, innerhalb derer $\max_i(v_1, \dots, v_N)$ das i -größte Element der Menge der vorliegenden Instanzen definiert.

$$S_t = \prod_{i=1}^t \max_i(v_1, \dots, v_N) \quad (3-2)$$

Es folgt, dass für vorgegebenes t nur die t Parameter mit den größten Wertebereichen einen Einfluss auf die Größe der Testsuite besitzen. Hieraus wird geschlussfolgert, dass die Größe der Testsuite entweder durch Elimination der Parameter mit der höchsten Anzahl an Diskretisierungsstufen oder Verringerung der Anzahl der entsprechenden Diskretisierungsstufen erreicht werden kann. Schuldt empfiehlt für die Ableitung konkreter Szenarien den Algorithmus *In Parameter Order General* (I-POG), welcher zur Gruppe der deterministisch iterativ erstellenden Algorithmen zählt. Im Gegensatz zu instantan erstellenden Algorithmen, welche die Testsuite zwar abhängig von der Anzahl und den Diskretisierungsstufen der Parameter mit geringerem Zeitaufwand erstellen, sind die iterativ erstellenden Algorithmen auf jedes Testobjekt anwendbar. Der IPOG-Algorithmus ist in der Lage, basierend auf vorgegebenen Eingangsparametern und deren Diskretisierungsstufen, eine Testsuite mit t -weiser Testabdeckung zu erzeugen. Vorteilhaft ist dabei, dass einer bestehenden Testsuite neue konkrete Szenarien hinzugefügt werden können, ohne die komplette Testsuite neu berechnen zu müssen.¹⁵⁷ Für weitere Ausführungen zur t -weisen Testabdeckung sowie weiteren kombinatorischen Ansätzen sei auf die Literatur verwiesen.^{158, 159, 160}

Die kombinatorischen Ansätze sind ohne Kenntnis des Quellcodes der Fahrfunktion anwendbar. Wäre die minimale Anzahl erforderlicher konkreter Szenarien zur Freigabe der betrachteten höher automatisierten Fahrfunktion bekannt, könnte diese innerhalb eines kombinatorischen Ansatzes berücksichtigt werden.

¹⁵⁵ Siebertz, K. et al.: Statistische Versuchsplanung (2017), S. 6 ff.

¹⁵⁶ Amersbach, C.; Winner, H.: Funktionale Dekomposition (2018), S. 2–5.

¹⁵⁷ Schuldt, F.: Diss., Methodischer Test automatisierter Fahrfunktionen (2017), S. 124.

¹⁵⁸ Amersbach, C.; Winner, H.: Funktionale Dekomposition (2018).

¹⁵⁹ Grindal, M. et al.: Combination testing strategies (2005).

¹⁶⁰ Nie, C.; Leung, H.: A survey of combinatorial testing (2011).

3.2.4.2 Äquivalenzklassenbildung und Grenzwertanalyse

Äquivalenzklassen werden, durch Gruppierung von Parameterwerten, mit dem Ziel gebildet, eine hohe Testabdeckung bei begrenzter Anzahl von Testfällen zu erreichen.¹⁶¹ Es wird davon ausgegangen, dass die Parameterwerte innerhalb einer Äquivalenzklasse das gleiche Verhalten des Testobjekts hervorrufen.¹⁶² Resultierend daraus sollte durch den Test mit einem Repräsentanten jeder Äquivalenzklasse die komplette Klasse als getestet angesehen werden können. Da die Äquivalenzklassen normalerweise von der Funktionsspezifikation abgeleitet werden, wird in diesem Zusammenhang von funktionalen Äquivalenzklassen gesprochen.^{163a}

In Bezug auf das Testen höher automatisierter Fahrfunktionen stellt die Äquivalenzklassenbildung eine große Herausforderung dar, wie von Block et al.¹⁶⁴ aufgezeigt. Dies lässt sich dadurch begründen, dass bereits kleine Änderungen eines Parameterwerts zu signifikanten Veränderungen des Verhaltens des Testobjekts führen können, was innerhalb funktionaler Äquivalenzklassen nicht hinreichend abbildbar ist. Schuldt schlägt eine nicht funktionale Gruppierung der Wertebereiche der verschiedenen Einflussparameter zur Generierung von Äquivalenzklassen vor. Basis dieser Form der Äquivalenzklassenbildung können die in Kap. 3.2.2 und Kap. 3.2.3 vorgestellten Informationsquellen und Methoden sein. In diesem Zusammenhang definiert Schuldt sogenannte valide und invalide Äquivalenzklassen, wobei valide Klassen beispielsweise Parameterwerte, welche innerhalb der Normen und Richtlinien liegen, enthalten. Invalide Klassen bestehen aus Werten außerhalb der Normen und Richtlinien. Im Hinblick auf die Robustheit einer höher automatisierten Fahrfunktion sollen beide Klassenarten in der Testsuite enthalten sein.¹⁶¹

Die Äquivalenzklassenbildung ist als partitionierende Testmethode den nachfolgenden Ansätzen zur Ableitung konkreter Szenarien vorgelagert anzuwenden, um diesen diskrete Eingangswerte bereit zu stellen. Für die Äquivalenzklassenbildung ist keine Information über den Quellcode notwendig. Die Erfüllung der prozessschrittspezifischen Forderungen nach minimaler Redundanz und minimaler Anzahl abgeleiteter Testfälle ist bei additiver Nutzung der Äquivalenzklassenbildung möglich und vom nachfolgenden Verfahren abhängig.

Eine Modifikation der Äquivalenzklassenbildung ist möglich, indem kein zufälliger Stellvertreter aus der entsprechenden Äquivalenzklasse ausgewählt wird. Bei der Grenzwertanalyse werden gezielt die Grenzwerte der jeweiligen Äquivalenzklasse zur Ableitung konkreter Szenarien herangezogen. Verschiedene Methoden dieser Herangehensweise werden in der Veröffentlichung von Arnicané¹⁶⁵ vorgestellt. Nach Liggesmeyer^{163b} ist es durch die Grenzwertanalyse möglich, Parameterwerte zu definieren, welche eine höhere Fehlersensitivität als andere Parameterwerte der entsprechenden Äquivalenzklasse aufweisen.

¹⁶¹ Schuldt, F.: Diss., Methodischer Test automatisierter Fahrfunktionen (2017), S. 120 f.

¹⁶² Kuhn, D. R. et al.: Software fault interactions (2004), S. 420.

¹⁶³ Liggesmeyer, P.: Software-Qualität (2009). a: S. 51 ff.; b: S. 196.

¹⁶⁴ Block, D. et al.: Simulations on consumer tests (2014).

¹⁶⁵ Arnicané, V.: Equivalence class and boundary value testing methods (2009).

3.2.4.3 Analyse empirischer Daten

In der Veröffentlichung von Kuhn et al.^{166a} werden empirische Daten aus Fehlerberichten von Softwaresystemen verschiedener Domänen analysiert. Dabei zeigt sich, dass für die untersuchten Systeme eine Kombination weniger Parameter zur Auslösung von Fehlern verantwortlich ist und in keinem der untersuchten Systeme mehr als sechs Parameter nötig waren, um in Kombination einen Fehler hervorzurufen. In diesem Zusammenhang wird die *failure-triggering fault interaction number* (FTFI-Zahl) eingeführt. Diese definiert die Anzahl an Parametern, die nötig sind, um in Kombination einen Fehler hervorzurufen. Die Autoren schlussfolgern, dass bei Kenntnis der FTFI-Zahl N_{FTFI} eines Systems das Testen aller N_{FTFI} -Tupel der vorliegenden Parameter – also eine N_{FTFI} -weise Testabdeckung – effektiv äquivalent zu einem erschöpfenden Test ist.

Amersbach und Winner¹⁶⁷ übertragen die Überlegungen auf das Testen höher automatisierter Fahrfunktionen. Ausgangspunkt sind dabei die Erkenntnisse von Gründel¹⁶⁸, welche aufzeigen, dass Verkehrsunfälle typischerweise durch eine Kombination mehrerer Parameter verursacht werden und in Einklang mit dem *Schweizer-Käse-Modell* nach Reason¹⁶⁹ stehen. Die daraus abgeleitete Annahme der Multikausalität der Fehlerentstehung bei höher automatisierten Fahrfunktionen bedingt eine FTFI-Zahl größer eins. Da für höher automatisierte Fahrfunktionen nicht genügend empirische Daten vorliegen, ist eine objektive Bestimmung der FTFI-Zahl derzeit nicht möglich. Die Autoren treffen die Annahme, dass die FTFI-Zahl höher automatisierter Fahrfunktionen in der gleichen Größenordnung wie bei Systemen anderer Domänen liegt und schätzen $3 \leq FTFI_{HAF} \leq 10$, um einen hinreichend großen Anteil aller Fehler aufzudecken.

Bei Heranziehen der FTFI-Zahl zur Definition der nötigen Testabdeckung kann keine Aussage darüber getroffen werden, ob die entstehende Anzahl von Testfällen minimal ist. Die Erfüllung der Anforderung nach minimaler Redundanz der abgeleiteten konkreten Szenarien hängt vom verwendeten kombinatorischen Algorithmus ab.^{166b} Die Ableitung konkreter Szenarien kann ohne Kenntnis des Quellcodes erfolgen.

3.2.4.4 Funktionale Dekomposition

Der Begriff der funktionalen Dekomposition umfasst die systematische Zerlegung der Haupt- und Nebenfunktionen eines Systems in eine Struktur von Funktionsblöcken sowie die Anordnung dieser Teilfunktionen in ihre Abfolge. Ziel ist die Erstellung einer Funktionshierarchie, welche das Erkennen von Schnittstellen zwischen Funktionsblöcken ermöglicht. Zudem soll die Dekomposition einzelne Teilfunktionen aufdecken, welche durch die genannten Schnittstellen verbunden, jedoch unabhängig voneinander sind. Die auf diese Weise entstehende Struktur erlaubt die Reduzierung der Komplexität des betrachteten Systems und ermöglicht das individuelle und parallele Testen spezifizierter

¹⁶⁶ Kuhn, D. R. et al.: Software fault interactions (2004). a: - ; b: S. 420.

¹⁶⁷ Amersbach, C.; Winner, H.: Funktionale Dekomposition (2018), S. 2–5.

¹⁶⁸ Gründel, M.: Diss., Fehler und Fehlverhalten als Ursache von Verkehrsunfällen (2005), S. 19 ff.

¹⁶⁹ Reason, J.: The contribution of latent human failures (1990).

Funktionen.¹⁷⁰ Die funktionale Dekomposition lässt sich vor allem bei Prozessen mit vielen Eingangsgrößen, die nacheinander oder parallel verarbeitet werden müssen, effektiv einsetzen.¹⁷¹

Die Methode der funktionalen Dekomposition ist in anderen Domänen ebenfalls etabliert.^{172a} Unter anderem wurde die Dekomposition der Fahraufgabe von Graab et al.¹⁷³ zur verkehrspsychologischen Analyse von Verkehrsunfällen angewandt, um Fehler in der Pre-Crash Phase¹⁷⁴ – die kurze Zeitspanne vor dem Unfall – zu klassifizieren. Resultat der Analyse ist das, von dem Fehlerklassifikationsmodell nach Rasmussen ausgehende, *5-Step Methode* genannte Prinzip zur Beschreibung des Informationsverarbeitungsprozesses vor Verkehrsunfällen. Dieses besteht aus den Ebenen *Informationszugang*, *Informationsaufnahme*, *Informationsverarbeitung*, *Zielsetzung* und *Handlung*.

Amersbach und Winner^{172b} übertragen diesen Ansatz auf die Testfallgenerierung höher automatisierter Fahrfunktionen. Dabei liegt die Annahme zu Grunde, dass das Freigabekriterium für den Test höher automatisierter Fahrfunktionen das Ausbleiben von Unfällen ist und diese auf Fehler zurückführbar sind. Abbildung 3-3 zeigt die vorgeschlagene Dekomposition höher automatisierter Fahrfunktionen, wobei die Ebene der Informationsverarbeitung in die Ebenen *Informationsverarbeitung* und *Situationsverständnis* aufgeteilt ist.

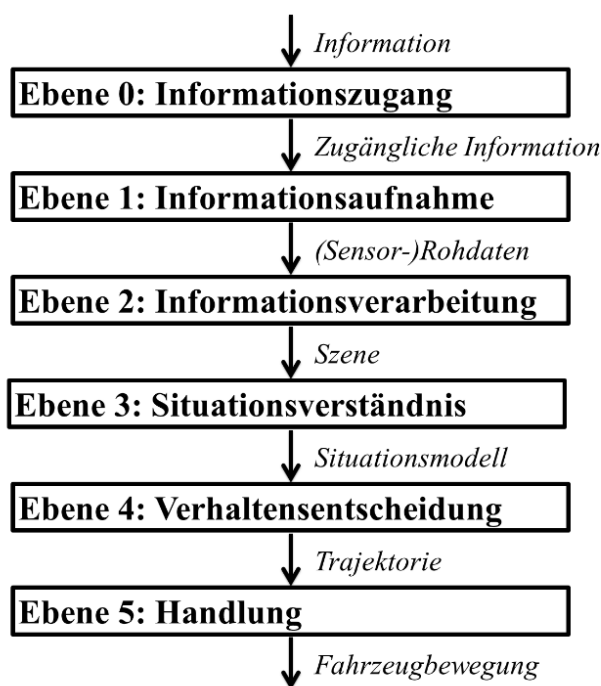


Abbildung 3-3: Dekompositionsebenen¹⁷⁵

¹⁷⁰ ITA: Dekomposition (2009), S. 1.

¹⁷¹ Krannich, K.-D.: Zerlegungsstrategien (1997).

¹⁷² Amersbach, C.; Winner, H.: Functional Decomposition (2017). a: S. 2; b: -.

¹⁷³ Graab, B. et al.: Analyse von Verkehrsunfällen.

¹⁷⁴ Breuer, J.: Bewertungsverfahren von Fahrerassistenzsystemen (2009), S. 62 f.

¹⁷⁵ Amersbach, C.; Winner, H.: Funktionale Dekomposition (2018), S. 5.

Eingangsgröße der Basisebene des Informationszugangs sind alle theoretisch zur Verfügung stehenden Informationen, beispielsweise die der Infrastruktur, des Wetters und der dynamischen Elemente. Ein Verkehrsschild, das durch parkende Fahrzeuge verdeckt wird, wäre beispielsweise der Ebene des Informationszugangs zuzuordnen, da diese Information den nachfolgenden Ebenen nicht zugänglich wäre. Die zugänglichen Informationen, welche für eine ideale höher automatisierte Fahrfunktion verfügbar wären, bilden die Schnittstelle zur Ebene der Informationsaufnahme. Diese beinhaltet die Gesamtheit der Umfelderkennungssensoren sowie eine etwaige V2X-Kommunikation. Die Schnittstelle zur Ebene der Informationsverarbeitung bilden sämtliche Sensorrohdaten und über die V2X-Kommunikation erhaltene Informationen. Innerhalb der Ebene der Informationsverarbeitung werden die genannten Eingangsgrößen durch Sensordatenfusion, Objektklassifizierung und Erzeugung eines Umfeldmodells zu einer Szene weiterverarbeitet. Diese bildet die Schnittstelle zur Ebene des Situationsverständnisses und wird innerhalb dieser durch ziel- und wertespezifische Informationsselektion sowie Augmentation zu einem Situationsmodell erweitert. Das Situationsmodell ist Basis der Verhaltensentscheidung. In dessen Abhängigkeit entscheidet ein Algorithmus über das Verhalten der höher automatisierten Fahrfunktion. Resultat der Verhaltensentscheidung ist eine Soll-Trajektorie, welche die Schnittstelle zur Handlungsebene bildet. Innerhalb dieser letzten Ebene, die unter anderem Algorithmen zur Regelung der Fahrdynamik sowie die Aktuatorik enthält, wird die Soll-Trajektorie in die aktuelle Fahrzeugbewegung umgesetzt.¹⁷⁶

Der Grundgedanke zur Erläuterung der sich aus der Anwendung der Methode ergebenden Vorteile ist, dass auch bei Anwendung des szenarienbasierten Testansatzes innerhalb mancher funktionaler Ebenen dieselben Fähigkeiten und Anforderung für mehrere konkrete Szenarien getestet werden. Beispielsweise ist es beim Zufahren auf ein Hindernis nur für die Ebenen der Informationsaufnahme und der Informationsverarbeitung relevant, um welche Art von Hindernis es sich handelt, wohingegen diese Information für die Verhaltensentscheidungs- und Handlungsebene irrelevant ist.¹⁷⁶

Amersbach und Winner¹⁷⁷ analysieren die Methode der funktionalen Dekomposition in Verbindung mit einer *t*-weisen Testabdeckung im Hinblick auf Reduktionseffekte des Parameterraums. Dabei werden drei maßgebliche Reduktionseffekte genannt, die aus dem Testen einzelner funktionaler Ebenen, den sogenannten Partikulärtests, resultieren. Der erste Reduktionseffekt ist dadurch begründet, dass der Parameterraum einer einzelnen funktionalen Ebene kleiner als der Parameterraum der gesamten höher automatisierten Fahrfunktion ist. Dies ergibt sich aus der Tatsache, dass die Einflussparameter eines Szenarios teilweise nur einige der funktionalen Ebenen beeinflussen und deren Parameterräume jeweils Teilmengen des Gesamtparameterraums sind. In Anlehnung an Kapitel 3.2.4.1 hat dies allerdings nur dann einen Einfluss auf die Anzahl resultierender konkreter Szenarien, wenn Parameter mit einer hohen Anzahl von Instanzen für einzelne Ebenen nicht relevant sind. Der zweite Reduktionseffekt basiert auf der Annahme, dass Systeme mit geringerer Komplexität eine kleinere Testabdeckung erfordern. Da die FTFI-Zahl eines Systems von dessen Komplexität abhängt wird

¹⁷⁶ Amersbach, C.; Winner, H.: Functional Decomposition (2017), S. 2 ff.

¹⁷⁷ Amersbach, C.; Winner, H.: Funktionale Dekomposition (2018).

davon ausgegangen, dass diese für die einzelnen funktionalen Ebenen im Vergleich zum Gesamtsystem mindestens um eins kleiner ist, was zu einer Reduktion des Parameterraums um circa eine Größenordnung führe. Der letztgenannte Reduktionseffekt entstehe daraus, dass der Test der Wahrnehmungsebenen für Mengen ähnlicher Szenarien zusammengefasst werden könne. Grund dafür sei, dass die Mehrheit der Parameter mit einem großen Wertebereich ausschließlich die, die Wahrnehmung betreffenden, Ebenen null bis zwei beeinflusste. Ein Zusammenfassen dieser Parameter in Äquivalenzklassenszenarien könne die Anzahl zu testender konkreter Szenarien weiter reduzieren, da die zugehörigen Ebenen nur in den Äquivalenzklassenszenarien getestet werden müssten, die den gesamten Parameterraum der beinhalteten Szenariengruppe abdecken.

Auf Grundlage dieser Analyse entwickeln Amersbach und Winner¹⁷⁶ einen Arbeitsprozess zur Definition partikulärer Testfälle, der aus den Prozessschritten *Identifikation funktionaler Szenarien*, *Erzeugung einer Übersichtsmatrix*, *Definition von Versagenskriterien*, *Eliminierung und Zusammenfassung von Versagenskriterien* sowie *Auswahl passender Testumgebung und Testfälle für die verbleibenden Versagenskriterien* besteht. Zur weiteren Systematisierung des Arbeitsprozesses schlägt Bickel¹⁷⁸ ein Schema zur Zuordnung der verschiedenen Einflussparameter zu den funktionalen Ebenen in Form eines Entscheidungsbaums vor.

In Abbildung 3-4 ist die Reduktion des Testumfangs, in Form des Quotienten aus Anzahl der Testfälle für einen Systemtest S_t System und Anzahl der Testfälle bei partikulärem Testen S_t partikulär, über der gewählten Testabdeckung dargestellt. Basis der Abbildung bildet die exemplarische Anwendung der funktionalen Dekomposition für ausgewählte funktionale Szenarien des Anwendungsfalls des Autobahn-Chauffeurs. Laut Aussage der Autoren führen die angesprochenen Effekte, wie aus Abbildung 3-4 ersichtlich, in Summe zur Reduktion des Umfangs der Testfälle um einen Faktor zwischen 130 für 3-weise Abdeckung und 20 für 10-weise Testabdeckung.

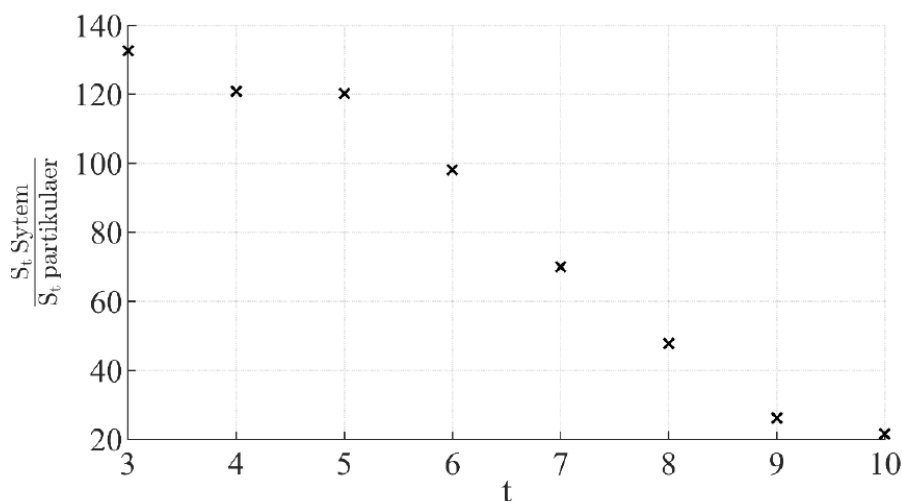


Abbildung 3-4: Reduktion des Testumfangs durch partikuläres Testen¹⁷⁹

¹⁷⁸ Bickel, J.: Masterthesis, Methode zur Identifikation, Diskretisierung und Zuordnung von Einflussparametern (2019), S. 70 ff.

¹⁷⁹ Amersbach, C.; Winner, H.: Funktionale Dekomposition (2018), S. 8.

Wie die Äquivalenzklassenbildung und Grenzwertanalyse lässt sich die Methode der funktionalen Dekomposition den partitionierenden Testmethoden zuordnen, weshalb für deren Bewertung bezüglich der gestellten Anforderungen dieselben Randbedingungen gelten.

Für die Anwendung der funktionalen Dekomposition ist ebenfalls keine Information über den Quellcode notwendig. Die Erfüllung der prozessschrittspezifischen Forderungen nach minimaler Redundanz und minimaler Anzahl abgeleiteter Testfälle ist bei additiver Nutzung der funktionalen Dekomposition ebenfalls möglich und vom nachfolgenden Verfahren abhängig. Die funktionale Dekomposition ist nicht auf die Kombination mit dem Ansatz *t*-weiser Testabdeckung beschränkt.

3.2.4.5 Randomisierte Algorithmen

Da die Reproduzierbarkeit eine Anforderung an jede wissenschaftliche Arbeit ist, benutzen randomisierte Algorithmen meist sogenannte Pseudo-Zufallszahlen, welche von deterministischen Algorithmen erzeugt werden.¹⁸⁰ Im Kontext der Absicherung höher automatisierter Fahrfunktionen sind randomisierte Algorithmen ebenfalls anwendbar, um konkrete Szenarien zu definieren. In der bereits in Kapitel 3.2.3.2 angeführten Veröffentlichung von Olivares et al.¹⁸¹ wird ein Framework vorgestellt, mit Hilfe dessen es möglich sein soll, konkrete Szenarien für die Simulation, auf Grundlage eines stochastischen Ansatzes, zu erzeugen. Das in der Veröffentlichung dargestellte Vorgehen zur Erzeugung virtueller Streckenverläufe bildet nach Aussage der Autoren den ersten Teil des Frameworks, das ein konkretes Szenario in seiner Gesamtheit erzeugen können soll. Dazu werden Markov-Ketten und Monte Carlo Methoden genutzt, um, auf Basis der Häufigkeitsverteilung der Kurvenkrümmung realer Autobahnen aus OpenStreetMap, relevante Parameterwerte abzutasten. Um die Forderung nach Reproduzierbarkeit einer Monte Carlo Simulation zu erfüllen, ist der verwendete Pseudo-Zufallszahlengenerator sowie dessen Startwert anzugeben.¹⁸⁰ Der Ansatz von Olivares et al. benötigt keine Informationen über den Quellcode des Testobjekts. Es kann allerdings keine Aussage darüber getroffen werden, inwiefern die Anzahl redundanter Testfälle minimiert wird, da bisher nur ein Einflussparameter analysiert wurde und keine Erläuterung erfolgt, auf welche Weise der Ansatz auf die Kombination mehrerer Einflussparameter übertragen werden soll.^{182a}

¹⁸⁰ Müller-Gronbach, T. et al.: Monte Carlo-Algorithmen (2012), S. 2.

¹⁸¹ Priälé Olivares, S. et al.: Virtual Stochastic Testing (2016).

¹⁸² Schuldt, F.: Diss., Methodischer Test automatisierter Fahrfunktionen (2017). a: S. 108; b: S. 101 ff.

3.3 Bewertung und Ableitung der Methodik

Auf Basis der in Kapitel 3.1 definierten makroskopischen sowie prozessschrittspezifischen Anforderungen an die zu entwickelte Methodik sowie der Analyse spezifischer Vor- und Nachteile der erläuterten Informationsquellen und Methoden zur Überführung funktionaler in konkrete Szenarien, kann eine systematische Bewertung dieser durchgeführt werden. Dabei orientieren sich die nachfolgenden Bewertungen an bestehenden Bewertungen der Literatur bezüglich dieser Thematik.^{182b,183} Bezugnehmend auf die Erläuterungen in Hinblick auf die Forderung nach Sicherheit in Kapitel 3.1.1 erfolgt für diese keine Bewertung. Die Ergebnisse der Bewertung bilden schließlich die Grundlage für die in dieser Arbeit entwickelte und in den nachfolgenden Kapiteln exemplarisch angewandte Methodik.

Für die nachfolgenden Bewertungstabellen gilt die in Tabelle 3-3 aufgeführte Nomenklatur der Bewertungssymbole. Die Bewertungssymbole weisen abhängig von der Art der überprüften Anforderung verschiedene Bedeutungen auf. Dabei sind die Bewertungssymbole in Hinblick auf die makroskopischen Anforderungen jeweils in Bezug auf die Kompatibilität einer Informationsquelle oder Methode mit den nachfolgenden Prozessschritten der Gesamtmethodik definiert. Beispielsweise führt die gute Kompatibilität von Normen und Richtlinien in Bezug auf die Integration in das vorhandene Simulationsframework dazu, dass diese Anforderung von den nachfolgenden Prozessschritten und schließlich auf makroskopischer Ebene von der Gesamtmethodik erfüllt werden kann. Die Bewertung hinsichtlich prozessschrittspezifischer Anforderungen erfolgt isoliert für die betrachte Informationsquelle in Bezug auf die Eignung zur Erfüllung der entsprechenden Anforderung.

Tabelle 3-3: Anforderungsabhängige Bedeutungen der Bewertungssymbole

Bewertungssymbol	Makroskopisch	Prozessschrittspezifisch
+	Gute Kompatibilität	Gute Eignung
○	Mittlere Kompatibilität	Prinzipielle Eignung
–	Schlechte Kompatibilität	Keine Eignung

In Tabelle 3-4 ist die Bewertung der Informationsquellen zur Auswahl potenzieller Einflussparameter zusammengefasst. Es wird deutlich, dass die verschiedenen Informationsquellen spezifische Vor- und Nachteile in Hinblick auf die Erfüllung der definierten Anforderungen aufweisen. So ist die Nutzung von Expertenwissen gut mit der Forderung nach einer möglichst frühzeitig im Entwicklungsprozess einsetzbaren Methodik kompatibel, jedoch schlecht kompatibel mit der Forderung nach Repräsentativität. Bei Nutzung der Funktionsspezifikation als Informationsquelle ergeben sich genau gegensätzliche Verhältnisse. Für detaillierte Erläuterungen der Bewertung aller aufgeführten Informationsquellen sei sowohl auf Kapitel 3.2.2 als auch auf die Literatur verwiesen.^{182b}

¹⁸³ Bickel, J.: Masterthesis, Methode zur Identifikation, Diskretisierung und Zuordnung von Einflussparametern (2019), S. 27 ff.

Es wird deutlich, dass Unfallanalysen und Expertenwissen insgesamt eine mittlere Eignung zur systematischen Auswahl potenzieller Einflussparameter für die vorliegende Aufgabenstellung aufweisen, während sich die anderen Informationsquellen gut eignen. Die Nutzung einer Informationsquelle schließt die Nutzung einer anderen Informationsquelle innerhalb dieses Prozessschritts nicht aus, so dass diese additiv verwendet werden können. Aus diesem Grund wird für die exemplarische Anwendung der Methodik, innerhalb der gegebenen Ressourcen, eine Maximierung der Nutzung der verfügbaren Informationsquellen umgesetzt.

Tabelle 3-4 : Bewertung der Informationsquellen zur Auswahl von Einflussparametern

<div> <div>Kriterien</div> <div>Informations- quellen</div> </div>	Effektivität			Effizienz			Gegebene Randbedingungen				Prozessschrittspezifisch		Σ
	Repräsentativ	Variierbar	Beobachtbar	Ökonomisch	Reproduzierbar	Frühzeitig	Integration in Framework	Funktionale Dekomposition	Parameterraum & Testumfang	Parameterraumreduktion	Relevante Einflussparameter	Repräsentativer Wertebereich	
Funktionsspezifikation	+	+	+	+	○	–	+	+	+	+	○	○	+
6-Ebenen-Modell	○	+	+	–	+	+	+	+	+	+	○	+	+
Normen und Richtlinien	+	+	+	○	+	+	+	+	+	+	+	○	+
Fahrmanöver & Fahrzeugkataloge	○	+	+	○	○	+	○	+	+	+	+	+	+
Unfallanalysen	○	○	+	○	○	○	○	+	+	+	○	+	○
Expertenwissen	–	○	○	–	+	+	○	+	+	+	○	○	○

Die Bewertung der Informationsquellen und Methoden zur Analyse potenzieller Einflussparameter ist in Tabelle 3-5 dargestellt. Die spezifischen Vor- und Nachteile führen dazu, dass sowohl die Sensitivitätsanalyse als auch statistische Auswertungen eine hohe Eignung zur Umsetzung dieses Prozessschrittes aufweisen. Die Bewertung der Sensitivitätsanalyse hat dabei allerdings perspektivischen Charakter, da hier angenommen wird, dass die in Kapitel 3.2.3.1 angesprochenen Herausforderungen der benötigten Anfangsbedingungen, in Form eines metrischen Validitätskriteriums und des Vorliegens eines Modells der Fahrfunktion, bereits gegeben sind. Damit zeigt sich das Potenzial der Methode, das bei Klären der erwähnten offenen Forschungsfragen ausgeschöpft werden könnte.

Aufgrund der in Summe hohen Eignung der Methode statistischer Auswertungen wird diese nachfolgend als Methode für den Prozessschritt der Analyse potenzieller Einflussparameter herangezogen.

Dabei ist anzumerken, dass die Bewertung bezüglich der Forderung nach einer ökonomischen Gesamtmethodik unter der Annahme einer in die Simulation überführten Messfahrt erfolgt. Für tiefergehende Erläuterungen spezifischer Vor- und Nachteile sei wiederum auf Kapitel 3.2.2 sowie die einschlägige Literatur verwiesen.^{184a}

Tabelle 3-5: Bewertung Informationsquellen & Methoden zur Analyse von Einflussparametern

Kriterien Informations- quellen	Effektivität			Effizienz			Gegebene Randbedingungen				Prozess- schrittspe- zifisch		Σ
	Repräsentativ	Variierbar	Beobachtbar	Ökonomisch	Reproduzierbar	Frühzeitig	Integration in Framework	Funktionale Dekomposition	Parameterraum & Testumfang	Parameterraumreduktion	Diskretisierungsfunktion	Fehlerwahrscheinlichkeit	
Sensitivitätsanalyse	+	+	+	○	+	–	+	+	+	+	+	+	+
Statistische Auswertungen	○	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	○	+
Optimierungsalgorithmen	○	+	○	–	+	–	+	+	+	+	+	○	○
Expertenwissen	○	○	○	○	+	+	○	+	+	○	+	○	○

Die Bewertung der Informationsquellen und Methoden zur Definition konkreter Szenarien erfolgt basierend auf der Annahme, dass die Analyse potenzieller Einflussparameter durch statistische Auswertungen erfolgt. Wie aus Tabelle 3-6 ersichtlich, weisen vier der fünf analysierten Informationsquellen und Methoden eine in Summe hohe Kompatibilität mit den gestellten Anforderungen auf, während randomisierte Algorithmen eine in Summe mittlere Eignung aufweisen. Die Äquivalenzklassenbildung und Grenzwertanalyse, die Analyse empirischer Daten und die funktionale Dekomposition sind dabei als additive Methoden zur Kombinatorik oder randomisierten Algorithmen anzusehen. Anzumerken ist, dass jede dieser drei additiven Methoden, in Bezug auf die Absicherung höher automatisierter Fahrfunktionen, bisher nur in Verbindung mit einem kombinatorischen Ansatz angewandt wurde.

Aufgrund der spezifischen Vor- und Nachteile der Kombinatorik, welche sowohl in Kap. 3.2.4.1 als auch in der Literatur^{184b} detailliert dargestellt sind, findet dieser Ansatz im Rahmen der vorliegenden Methodik Anwendung. Zudem wird die Methode der funktionalen Dekomposition, aufgrund von sowohl ihrer hohen Eignung als auch der Definition der vorliegenden Aufgabenstellung, im Rahmen der entwickelten Methodik eingesetzt. Außerdem werden die Annahmen und Schlussfolgerungen aus

¹⁸⁴ Schuldt, F.: Diss., Methodischer Test automatisierter Fahrfunktionen (2017). a: S. 101 f.; b: S. 121 ff.

der Analyse empirischer Daten von Amersbach und Winner¹⁸⁵ in der Methodik berücksichtigt. Darüber hinaus wird der Ansatz der Äquivalenzklassenbildung mit den statistischen Auswertungen gekoppelt, indem wahrscheinlichkeitsbasierte Äquivalenzklassen definiert werden.

Tabelle 3-6: Bewertung der Informationsquellen zur Definition konkreter Szenarien

Kriterien Informationsquellen	Effektivität			Effizienz			Gegebene Randbedingungen				Prozessschritt-spezifisch			Σ
	Repräsentativ	Variierbar	Beobachtbar	Ökonomisch	Reproduzierbar	Frühzeitig	Integration in Framework	Funktionale Dekomposition	Parameterraum & Testumfang	Parameterraumreduktion	Minimale Anzahl	Minimale Redundanz	Quellcode	
Kombinatorik	+	+	+	+	○	+	+	+	+	+	○	+	+	+
Randomisierte Algorithmen	+	○	○	○	○	+	+	+	+	+	○	–	+	○
Äquivalenzklassenbildung & Grenzwertanalyse	○	○	+	○	+	+	○	+	+	+	○	○	+	+
Analyse empirischer Daten	○	+	+	–	+	+	+	+	+	+	○	+	+	+
Funktionale Dekomposition	+	+	+	○	+	+	○	+	+	+	○	+	+	+

In Abbildung 3-5 sind die Ergebnisse der Methodenentwicklung visualisiert. Innerhalb der Abbildung sind die verschiedenen Prozessschritte zur systematischen Auswahl logischer Szenarien sowie deren Überführung in konkrete Szenarien mit den jeweiligen Informationsquellen und Methoden zur Umsetzung des entsprechenden Prozessschritts dargestellt. Außerdem sind die verschiedenen Prozessschritte den unterschiedlichen Abstraktionsebenen von Szenarien zugeordnet. Die strichlierten Kästen zeigen die für den jeweiligen Prozessschritt spezifischen Informationsquellen und Methoden auf, welche im Rahmen der Demonstration der Anwendbarkeit der Methodik Verwendung finden. Die Pfeile zwischen den strichlierten Kästen verdeutlichen die Abfolge für die Anwendung der Methodik. Das detaillierte Vorgehen im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde bereits in Kapitel 1.3 dargelegt. Hierbei ist explizit anzumerken, dass dieses detaillierte Vorgehen aus den Erkenntnissen des vorliegenden Kapitels resultiert.

¹⁸⁵ Amersbach, C.; Winner, H.: Funktionale Dekomposition (2018), S. 3 ff.

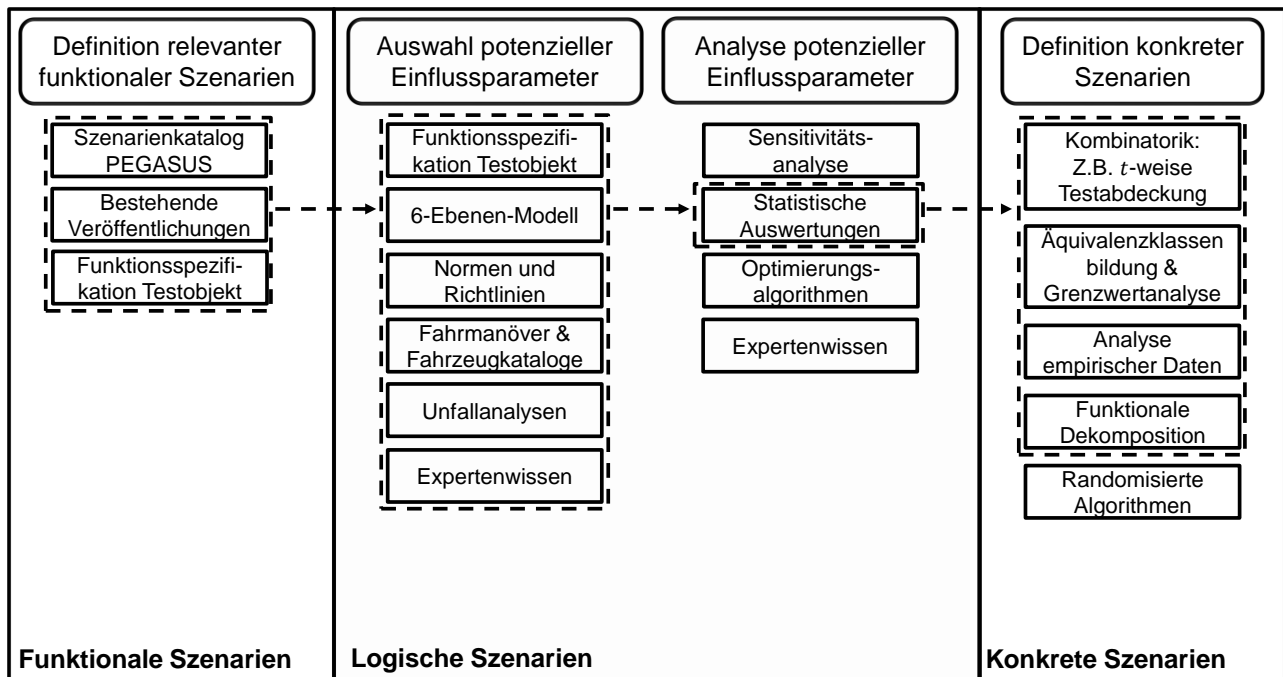


Abbildung 3-5: Gesamtmethodik mit für die Anwendung ausgewählten Informationsquellen und Methoden

4 Anwendung der Methodik im Simulationsframework

Das folgende Kapitel beschreibt die Anwendung der im vorherigen Kapitel entwickelten Methodik zur systematischen Auswahl logischer Szenarien und deren Überführung in konkrete Szenarien. Die Gliederung des Kapitels ist an die Abfolge der Prozessschritte der entwickelten Methodik angelehnt.

4.1 Definition funktionaler Szenarien

Den ersten Prozessschritt der Methodik bildet die Definition relevanter funktionaler Szenarien. Zur Umsetzung dieses Prozessschritts wird auf alle, im Rahmen der Methodenentwicklung identifizierten, Informationsquellen zurückgegriffen.

4.1.1 Funktionsspezifikation des Testobjekts

In Tabelle 4-1 sind die vorliegenden szenarienrelevanten Informationen der Funktionsspezifikation des Traffic-Jam-Chauffeurs zusammengefasst.^{186,187} Neben der Angabe zur Automationsstufe und der Spezifizierung der Übernahmeaufforderung erfolgt die Kategorisierung in Anlehnung an die SAE J3016 in Form von Einschränkung der ODD sowie längs- und querdynamischen Einschränkungen der Fahrfunktion.

Tabelle 4-1: Szenarienrelevante Informationen der Funktionsspezifikation

Szenarienrelevante Informationen		
Nr.	Kategorie	Beschreibung
1	Automationsstufe	Level 3 nach SAE J3016
2	Übernahmeaufforderung	5-10 Sekunden vor Notwendigkeit eines Manövers
3	Einschränkung ODD	Schnellstraßen mit je zwei Richtungsfahrbahnen
4	Einschränkung ODD	Keine Mautstationen, Tunnel, Unfallorte oder Arbeitsstellen
5	Einschränkung DDT	In Stausituationen
6	Einschränkung DDT Längsdynamik	0-60 km/h
7	Einschränkung DDT Längsdynamik	Vorausfahrendes Fahrzeug benötigt
8	Einschränkung DTT Querdynamik	Kein Fahrstreifenwechsel

Der TJC ist dem Automationslevel 3 nach SAE J3016 zuzuordnen, womit die Fahrfunktion in vorgegebenen Anwendungsszenarien in der Lage ist, die gesamte dynamische Fahraufgabe zu bewältigen. Währenddessen muss der Fahrzeugführende, bezogen auf die vorliegende Funktionsspezifikation, in-

¹⁸⁶ PSA: Funktionsbeschreibung Traffic Jam Chauffeur.

¹⁸⁷ Abadie, V.: Autonomous Vehicle (2018), S. 10 ff.

nerhalb einer Latenzzeit von 5-10 Sekunden bereit sein, die dynamische Fahraufgabe zu übernehmen.¹⁸⁸ Einschränkungen bezüglich der relevanten Anwendungsszenarien ergeben sich daraus, dass die Fahrfunktion nur auf Schnellstraßen mit je zwei Richtungsfahrbahnen einsetzbar ist. Außerdem ist die Fahrfunktion im Bereich von Mautstationen, Tunnel, Unfallorten oder Baustellen nicht nutzbar. Die Aktivierung ist auf einen Geschwindigkeitsbereich von 0-60 km/h beschränkt und es wird stets ein vorausfahrendes Fahrzeug benötigt. Die Fahrfunktion kann während ihrer Aktivierung keinen Fahrstreifenwechsel durchführen.

Durch die aufgeführten Informationen werden Aspekte von Szenen beschrieben, welche für die betrachtete Fahrfunktion relevant sind. Mit diesem Wissen lassen sich wiederum Szenen ausschließen, welche für die betrachtete Fahrfunktion irrelevant sind.¹⁸⁹

4.1.2 Szenarienkatalog PEGASUS und bestehende Veröffentlichungen

Innerhalb mehrerer Veröffentlichungen, welche im Rahmen des PEGASUS-Projekts entstanden sind, werden funktionale Szenarien für den Anwendungsfall des sogenannten Autobahn-Chauffeurs definiert.^{190,191,192} Die im Rahmen dieser Arbeit betrachtete, höher automatisierte Fahrfunktion des Traffic-Jam-Chauffeurs ist aufgrund von deren, in Kapitel 4.1.1 erläuterten, Funktionsspezifikation als Teilfunktionalität des Autobahn-Chauffeurs anzusehen. Daraus folgt, dass die in Frage kommenden funktionalen Szenarien für den vorliegenden Anwendungsfall eine Teilmenge der im Rahmen von PEGASUS definierten funktionalen Szenarien sind. Diese bestehen aus den funktionalen Szenarien *Freie Fahrt*, *Folgefahrt*, *Fahrstreifenwechsel*, *Einscherer voraus*, *Ausscherer voraus*, *Durchscherer*, *Zufahrt auf Hindernis*, *Annäherung an Stauende* und das sogenannte *Schweizer Szenario*. In der Masterthesis von Aouini¹⁹³ werden zudem die funktionalen Szenarien *Staufahrt*, *Rechtsüberholverbot* und *Falschfahrer* definiert.

Es existieren weitere Veröffentlichungen außerhalb von PEGASUS, welche Szenarien für die Absicherung automatisierter Fahrfunktionen betrachten. Hierbei ist unter anderem das Testszenario für ein *lane departure warning* (LDW) System¹⁹⁴ und das Beispielszenario innerhalb des Anhangs der SOTIF-Norm¹⁹⁵ zu nennen.

¹⁸⁸ Vgl. Kapitel 2.2.1 (Kategorisierung und Nomenklatur von Systemen der Automation der Fahraufgabe).

¹⁸⁹ Schuldt, F.: Diss., Methodischer Test automatisierter Fahrunktionen (2017), S. 90.

¹⁹⁰ Amersbach, C.; Winner, H.: Functional Decomposition (2017), S. 5.

¹⁹¹ Amersbach, C.; Winner, H.: Required and Feasible Test Coverage (2019), S. 2.

¹⁹² Bagschik, G. et al.: Wissensbasierte Szenariengenerierung (2018), S. 8 ff.

¹⁹³ Aouini, R.: Masterthesis, Reduktionspotential funktionale Dekomposition (2018), S. 25 f.

¹⁹⁴ Gao, F. et al.: A test scenario automatic generation strategy (2019), S. 6 ff.

¹⁹⁵ ISO: 21448:2019 Road Vehicles -- Safety of the intended functionality (2019).

4.1.3 Ableitung exemplarischer funktionaler Szenarien

Die Erkenntnisse der beiden vorherigen Kapitel werden genutzt, um nachfolgend exemplarische funktionale Szenarien abzuleiten, welche die Basis für die Auswahl potenzieller Einflussparameter bilden. Dazu werden zunächst die durch die Funktionsspezifikation gewonnenen Informationen genutzt, um die für den Anwendungsfall des Traffic-Jam-Chauffeurs relevanten funktionalen Szenarien aus den in PEGASUS definierten funktionalen Szenarien zu extrahieren.

Da der TJC nicht in der Lage ist die dynamische Fahraufgabe ohne ein vorausfahrendes Fahrzeug zu bewältigen, wird das funktionale Szenario *Freie Fahrt* ausgeschlossen. Aufgrund der Einschränkung, dass der TJC keinen selbstständigen Fahrstreifenwechsel durchführen kann scheidet das entsprechende funktionale Szenario *Fahrstreifenwechsel* ebenfalls aus. Für den Anwendungsfall des TJC ist das funktionale Szenario *Annäherung an Stauende* lediglich für das vorausfahrende Fahrzeug relevant, welches, durch dessen Reaktion, die konkrete Ausgestaltung des funktionalen Szenarios *Folgefahrt* für das Ego-Fahrzeug beeinflusst. Da sich die Übernahme der dynamischen Fahraufgabe durch den Traffic-Jam-Chauffeur auf Stausituationen beschränkt, sind alle verbleibenden funktionalen Szenarien unter der Randbedingung einer vorliegenden Stausituation zu interpretieren. Dadurch wird das eigenständige Szenario *Staufahrt* überflüssig und ist als notwendige Bedingung für die Betrachtung der verbleibenden funktionalen Szenarien anzusehen. Das funktionale Szenario *Rechtsüberholverbot*, welches das Einhalten des Rechtsüberholverbots der betrachteten Fahrfunktion absichern soll, ist für den Anwendungsfall des Traffic-Jam-Chauffeurs ebenfalls nicht relevant, da auf deutschen Autobahnen und autobahnähnlichen Straßen¹⁹⁶ nach § 7 Absatz 2 der Straßenverkehrs-Ordnung (StVO) bei so dichtem Verkehr, dass sich auf den Fahrstreifen für eine Richtung Fahrzeugschlangen ausgebildet haben, rechts schneller als links gefahren werden darf. Zudem wird in der StVO beschrieben, dass bei Ausbildung einer stehenden oder sich langsam fortbewegenden Fahrzeugschlange auf dem jeweils linken Fahrstreifen mit „[...] geringfügig höherer Geschwindigkeit und mit äußerster Vorsicht [...]“ rechts überholt werden darf.¹⁹⁷ Das funktionale Szenario *Falschfahrer* wird für den Anwendungsfall des TJC ebenfalls als irrelevant betrachtet, da zum einen angenommen wird, dass die Anzahl von Falschfahrern während Stausituationen vernachlässigbar klein ist und bei Eintritt des Szenarios mit nicht kritischen Geschwindigkeitsdifferenzen zu rechnen ist. Zum anderen ist durch einen Falschfahrer vor allem bei Nichtvorhandensein eines vorausfahrenden Fahrzeugs mit einem kritischen Szenario zu rechnen, was in einem Szenario außerhalb der Funktionsspezifikation des TJC resultiert.

Tabelle 4-2 fasst die verbleibenden, relevanten funktionalen Szenarien für den Anwendungsfall des TJC zusammen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden zwei funktionalen Szenarien ausgewählt, um die Anwendbarkeit der in Kapitel 3 entwickelten Methodik exemplarisch zu demonstrieren.

¹⁹⁶ Begriffserklärung siehe FGSV: Richtlinien für die Anlage von Autobahnen, S. 16 f.

¹⁹⁷ BMJV: StVO (2013), S. 4.

Tabelle 4-2: Relevante funktionale Szenarien für den Anwendungsfall Traffic-Jam-Chauffeur

Relevante funktionale Szenarien	
Nr.	Bezeichnung
1	Folgefahrt
2	Einscherer
3	Ausscherer
4	Durchscherer
5	Zufahrt auf Hindernis
6	Schweizer Szenario
7	Stauauflösung (Take-over-Szenario)

Das Szenario *Einscherer* ist, basierend auf der Bewertung von Aouini¹⁹⁸, innerhalb der in PEGASUS betrachteten funktionalen Szenarien, in Hinblick auf den zu erwartenden Aufwand und das Risikopotenzial, als Worst-Case-Szenario anzusehen. Aus den genannten Gründen wird es als eines der beiden funktionalen Szenarien, mit Hilfe derer die Anwendbarkeit der Methodik demonstriert wird, ausgewählt. In Abbildung 4-1 ist das Szenario exemplarisch in Form der Startszene sowie der geplanten Trajektorien durch die strichlierten Linien mit Pfeilen aufgezeigt. In einer Stausituation befindet sich das Ego-Fahrzeug (Ego) bei aktiviertem TJC in Folgefahrt zum vorausfahrenden Fahrzeug (Obj1), während ein Fahrzeug auf dem benachbarten Fahrstreifen (Obj 2) einen Einschervorgang einleitet. Die gestrichelt dargestellten restlichen Verkehrsteilnehmer dienen der Verdeutlichung des Szenarios.

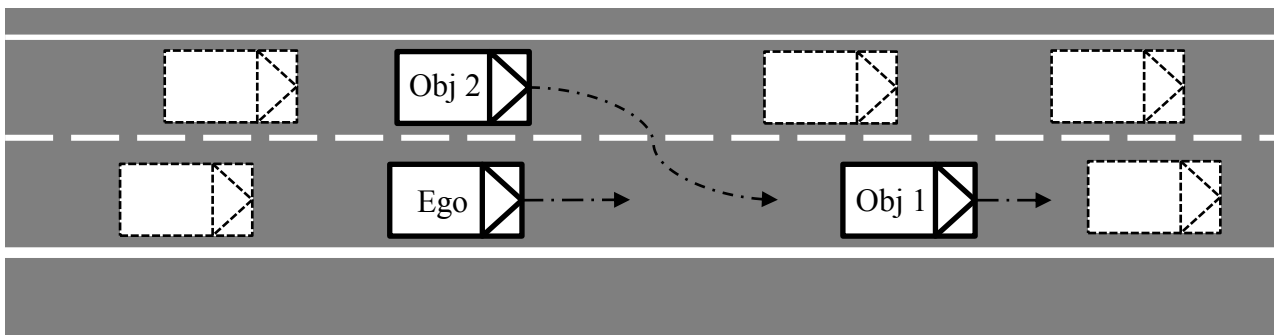


Abbildung 4-1: Visualisierung des funktionalen Szenarios *Einscherer*

Charakteristikum einer Level 3 Fahrfunktion nach SAE J3016 ist das Vorhandensein eines, als Rückfallebene zur Verfügung stehenden, Fahrzeugführendens, welcher in einer vorgegebenen Latenzzeit die dynamische Fahraufgabe übernimmt. Der Prozess der Übernahme des Fahrzeugführendens nach Aufforderung durch das Fahrzeug ist als entscheidender Aspekt in Bezug auf die Kontrollierbarkeit

¹⁹⁸ Aouini, R.: Masterthesis, Reduktionspotential funktionale Dekomposition (2018), S. 25 f.

des höher automatisierten Fahrzeugs anzusehen.¹⁹⁹ Auf Grundlage dieser Überlegungen wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit das funktionale Szenario *Stauauflösung* definiert, welches in Abbildung 4-2 visualisiert ist. Dieses Szenario zielt auf die Absicherung der Übernahme der dynamischen Fahraufgabe bei Erreichen der Systemgrenzen der Fahrfunktion ab. Im Detail ist das Szenario in der Art ausgestaltet, dass sich das Ego-Fahrzeug zunächst während einer Stausituation in Folgefahrt zum vorausfahrenden Fahrzeug befindet. Durch eine sich vermindernde Verkehrsdichte im Bereich des vorausfahrenden Fahrzeugs erhöht dieses seine Geschwindigkeit. Resultierend daraus erfolgt durch das Ego-Fahrzeug eine Übernahmeaufforderung an den Fahrzeugführenden, sobald die Fahrfunktion ein Ausschöpfen der Systemgrenzen innerhalb der vorgegebenen Latenzzeit erkennt. Dieses Szenario bildet das zweite funktionale Szenario zur Demonstration der Anwendbarkeit der entwickelten Methodik.

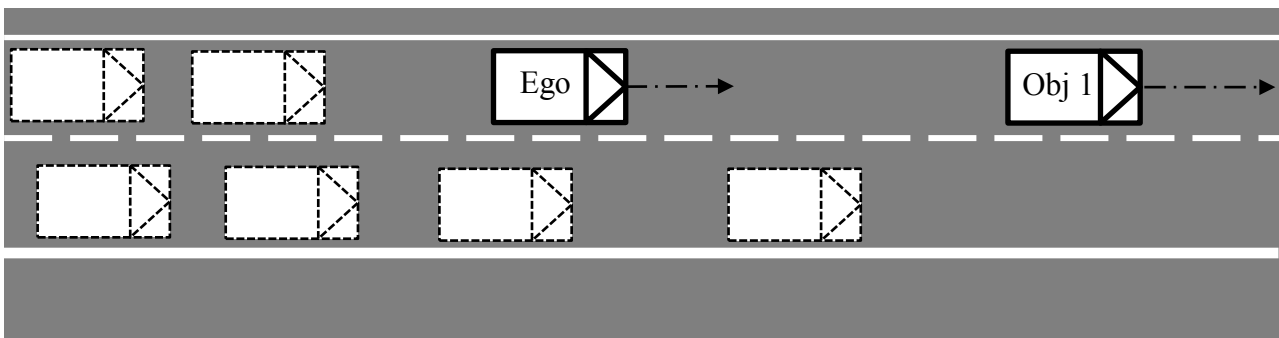


Abbildung 4-2: Visualisierung des funktionalen Szenarios *Stauauflösung*

¹⁹⁹ Feldhütter, A. et al.: Influences on Take-Over Performance (2017), S. 309 f.

4.2 Auswahl potenzieller Einflussparameter

Auf Basis der im vorherigen Kapitel 4.1 definierten funktionalen Szenarien *Einscherer* und *Stauauflösung* zur exemplarischen Demonstration der Anwendbarkeit der entwickelten Methodik wird nachfolgend die Auswahl potenzieller Einflussparameter für diese funktionalen Szenarien aufgezeigt.

Auf Grundlage der Bewertung in Kapitel 3.3 weisen die Informationsquellen und Methoden *Funktionsspezifikation*, *6-Ebenen-Modell*, *Normen und Richtlinien* sowie *Fahrmanöver & Fahrzeugkataloge* eine hohe Eignung bezüglich der gestellten Anforderungen auf, weshalb diese für die Auswahl potenzieller Einflussparameter angewandt werden. *Expertenwissen* und *Unfallanalysen*, welche in Summe eine mittlere Eignung zur Auswahl potenzieller Einflussparameter aufweisen, werden zusätzlich indirekt genutzt, da Erkenntnisse des PEGASUS-Projekts in Hinblick auf potenzielle Einflussparameter, die wiederum zum Teil Expertenwissen und Unfallanalysen entstammen, ebenfalls in die Überlegungen zur vorliegenden Auswahl potenzieller Einflussparameter mit einbezogen werden.

Da die Mehrzahl der verwendeten Informationsquellen und Methoden zur Auswahl potenzieller Einflussparameter spezifischer Ebenen innerhalb des 6-Ebenen-Modells nutzbar ist, erfolgt der Aufbau des nachfolgenden Kapitels in Anlehnung an das 6-Ebenen-Modell. Dessen Anwendung erlaubt dabei eine systematische Strukturierung der Einflussparameter der betrachteten funktionalen Szenarien, ist durch seinen generischen Charakter sukzessive erweiterbar und kann bei Betrachtung weiterer funktionaler Szenarien als Informationsspeicher dienen.²⁰⁰

Anzumerken ist, dass im Rahmen der vorliegenden Arbeit keine Auswahl potenzieller Einflussparameter der dritten und sechsten Ebene des 6-Ebenen-Modells erfolgt. Bezogen auf die dritte Ebene der temporären Beeinflussung der ersten beiden Ebenen, welche sich beispielsweise in Form einer Arbeitsstelle darstellen können, lässt sich dies dadurch begründen, dass sich daraus ergebende funktionale Szenarien außerhalb der Funktionsspezifikation des Traffic-Jam-Chauffeurs befänden. Die sechste Ebene der digitalen Information wird nicht betrachtet, da für die betrachtete Fahrfunktion kein Informationszugang durch V2X-Kommunikation vorgesehen ist.

4.2.1 Ebenen 1 und 2: Straßenebene und Straßenausstattung

Zur Auswahl potenzieller Einflussparameter der Straßenebene und Straßenausstattung, welche sowohl die Geometrie als auch die Topologie des betrachteten Straßennetzwerks beschreiben, werden die Funktionsspezifikation sowie Normen und Richtlinien herangezogen. Dabei erlaubt die Funktionsspezifikation des Testobjekts durch Einschränkungen der ODD eine Reduktion nutzbringend einsetzbarer Normen und Richtlinien. Diese ermöglichen anschließend eine Auswahl potenzieller Einflussparameter sowie zu erwartender Wertebereiche für die stationären Elemente der Straße.

²⁰⁰ Schuldt, F.: Diss., Methodischer Test automatisierter Fahrfunktionen (2017), S. 90 f.

Durch die Einschränkung der ODD auf Schnellstraßen mit je zwei Richtungsfahrbahnen²⁰¹ kann der Betrachtungsrahmen innerhalb der Normen und Richtlinien auf autobahnähnliche Straßen²⁰² reduziert werden. Aus diesem Grund werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Richtlinien für die Anlage von Autobahnen²⁰² (RAA) sowie die Richtlinien für die Markierung von Straßen²⁰³ (RMS) der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) zum Ableiten potenzieller Einflussparameter verwendet. Weiterhin erfolgt die Auswahl unter Berücksichtigung der Formatspezifikation des OpenDrive-Formats der Version 1.5²⁰⁴, da diese einerseits ein einheitliches Verständnis der Bezeichnungen ausgewählter Einflussparameter fördert und das Format durch seinen hierarchischen Aufbau eine systematische Ableitung potenzieller Einflussparameter unterstützt. Da das Format ein Resultat der Beachtung von Anforderungen verschiedener Interessengruppen ist sowie eine umfassende und einheitliche Beschreibung der Straßenebene und Straßenausstattung zum Ziel hat²⁰⁵, bietet es zusätzliches Potenzial zur Bewältigung dieser Aufgabe.

Die RAA definiert innerhalb der Kategoriengruppe der Autobahnen abhängig von der Lage der zu bebauenden Gebiete und der Straßenwidmung verschiedene Entwurfsklassen (EKA), welche Grenz- und Richtwerte für die jeweiligen Entwurfs- und Betriebselemente festlegen. Von der Entwurfsklasse unmittelbar bestimmt sind Regelquerschnitte (RQ), welche sich als vier-, sechs- oder achtstreifige Fahrbahnen äußern. Die Auswahl des jeweiligen Regelquerschnitts innerhalb einer Entwurfsklasse erfolgt basierend auf der Verkehrsstärke, welche die Anzahl an die Autobahn passierenden Fahrzeugen je 24 Stunden angibt.²⁰² Da die Funktionsspezifikation des TJC keine Einschränkung bzgl. der Entwurfsklassen aufzeigt, sind für das Ableiten der Wertebereiche der Einflussparameter grundsätzlich die Grenzwerte aller Regelquerschnitte innerhalb der Kategoriengruppe der Autobahnen relevant.

Innerhalb der verschiedenen Regelquerschnitte werden fahrstreifenspezifische Fahrstreifenbreiten definiert, welche entwurfsklassenabhängig die Werte 3.25 m, 3.50 m oder 3.75 m annehmen können. Weiterhin werden durch die RAA Kurvenmindestradien in Abhängigkeit von der Entwurfsklasse sowie der vorliegenden Querneigung festgelegt. Der Mindestradius r_{\min} ergibt sich bei einer Querneigung von $q = 6 \%$ zu $r_{\min} = 280 \text{ m}$ und bei einer Querneigung von $q = 2.5 \%$ zu $r_{\min} = 930 \text{ m}$ für die EKA 3 der Stadtautobahnen im Bereich freier Strecke.²⁰² Da der Radius als Maß für eine Kurve oder einer Kurvigkeit wegen seines Pols beim neutralen Wert ungeeignet ist²⁰⁶ – ein gerader Streckenabschnitt ist dem Wert $r = \infty$ zuzuordnen – wird in der vorliegenden Arbeit die Krümmung $\kappa = 1/r$ verwendet. Auf diese Weise ergibt sich der erwartete Wertebereich durch die Mindestkrümmung $\kappa_{\min} = 0$ und die Maximalkrümmung $\kappa_{\max} = \frac{1}{280 \text{ m}} = 3.57 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{m}}$ für den potenziellen Einflussparameter der Kurvenkrümmung. Die Richtlinien für die Anlage von Autobahnen machen

²⁰¹ Engl. Bezeichnung: dual carriageways.

²⁰² FGSV: Richtlinien für die Anlage von Autobahnen.

²⁰³ FGSV: Richtlinien für die Markierung von Straßen (1993).

²⁰⁴ VIRES Simulationstechnologie GmbH: OpenDRIVE Format Specification (2019).

²⁰⁵ VIRES Simulationstechnologie GmbH: OpenDRIVE.

²⁰⁶ Winner, H.: Leitfaden zu Dissertation und Entwicklungsberichten (2018), S. 7.

weiterhin Vorgaben für die Querneigung einer Richtungsfahrbahn in Abhängigkeit der Bereiche von Geraden oder Kreisbögen. In Abbildung 4-3 ist die Querneigungsdefinition innerhalb der RAA anhand der rechten Richtungsfahrbahn, wobei die weiß ausgefüllte, dargestellte Fahrbahn den Zustand ohne Querneigung und die schwarz ausgefüllte, dargestellte Fahrbahn den Zustand positiver Querneigung repräsentiert, veranschaulicht. Die RAA gibt vor Richtungsfahrbahnen im Bereich von Geraden aus Gründen der Entwässerung mit einer in Fahrtrichtung einseitigen, positiven Mindestquerneigung von $q_{\min} = 2.5 \%$ nach außen anzulegen. In Kreisbögen ist die Querneigung aus fahrdynamischen Gründen nach innen anzulegen, sodass Abbildung 4-3 den Fall einer Rechtskurve der in Fahrtrichtung rechten Richtungsfahrbahn widerspiegelt, wobei der durch die vier kleineren Rechtecke dargestellte Teil den Seitenstreifen repräsentiert. In Kreisbögen beträgt die Mindestquerneigung ebenfalls $q_{\min} = 2.5 \%$ und es wird eine maximale Querneigung von $q_{\max} = 6 \%$ vorgegeben, welche von der Entwurfsklasse und dem vorliegenden Kurvenradius abhängig ist.

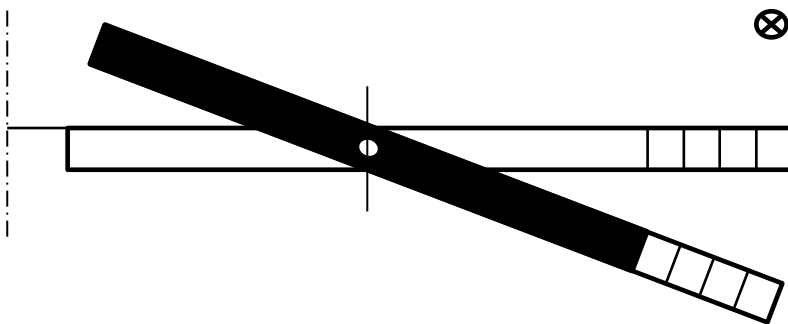


Abbildung 4-3: Veranschaulichung der Querneigungsdefinition nach RAA (positive Querneigung bei Fahrtrichtung in Zeichenebene)

Die RAA macht zudem abhängig von der Entwurfsklasse Vorgaben zu den Längsneigungen eines Straßenabschnitts. Es wird eine maximale Längsneigung von $G_{\max} = \pm 6 \%$ definiert, wobei auf eine zusätzliche maximale Schrägneigung als resultierende Falllinienneigung aus Längs- und Querneigung hingewiesen wird.²⁰² Für mögliche Abweichungen von den zuvor genannten Grenzwerten in definierten Ausnahmefällen sowie im Falle der Anlage von Brücken und Tunnels sei auf die entsprechende Norm verwiesen.

Innerhalb des ersten Teils der Richtlinien für die Markierung von Straßen werden Abmessungen und geometrische Anordnungen von Markierungszeichen definiert.²⁰⁷ Da die betrachtete Fahrfunktion in der Lage sein muss die aktuelle laterale Position innerhalb des Fahrstreifens zu erkennen – also die Funktion eines Spurhalteassistenten als Teilfunktion des TJC's anzusehen ist – und deren Güte von der Qualität der Fahrstreifenmarkierungserkennung abhängt²⁰⁸, sind die möglichen Ausprägungen von Fahrstreifenmarkierungen ebenfalls als potenzielle Einflussparameter zu betrachten. Die RMS gibt 10 Grundformen von Markierungszeichen vor, welche sich durch Markierungstyp (durchgezogen oder unterbrochen), Markierungsbreite (0.15 m, 0.30 m), Abstand der Markierungselemente

²⁰⁷ FGSV: Richtlinien für die Markierung von Straßen (1993).

²⁰⁸ Bartels, A. et al.: Querführungsassistent (2009), S. 941 ff.

(3 m, 6 m, 12 m) sowie Anzahl der Linien (einfache Linie oder Doppellinie) unterscheiden. Die Markierungselementlänge variiert ebenfalls in Abhängigkeit der Kategoriengruppe. Da sich die Betrachtungen dieser Arbeit allerdings auf den Anwendungsfall des TJC und damit auf die Kategoriengruppe der Autobahnen beschränken, beträgt die Markierungselementlänge stets 6 m. Die Definition der Einflussparameter kann in der Art erfolgen, dass die genannten Unterscheidungsmerkmale als einzelne Einflussparameter aufgenommen werden und Abhängigkeiten zwischen diesen Parametern zur Vermeidung in der Realität nicht vorkommender Kombinationen beispielsweise durch Ontologien²⁰⁹ abgebildet werden. Alternativ kann der Markierungstyp als Einflussparameter aufgenommen werden, der die Abhängigkeiten bereits berücksichtigt und, im Vergleich zur Definition mehrerer Parameter, eine höhere Instanzenanzahl aufweist. Da die Abbildung von Ontologien nicht Teil dieser Arbeit ist und der Schwerpunkt auf der systematischen Ableitung logischer Szenarien sowie des entsprechenden Parameterraums liegt, werden die Unterscheidungsmerkmale dem Parameter Fahrstreifenmarkierungstyp subsumiert. Anzumerken ist, dass dennoch Abhängigkeiten auf Grund der Tatsache zu berücksichtigen sind, dass beispielsweise nicht jede Kombination des Fahrstreifenmarkierungstyps für die jeweils linke und rechte Fahrstreifenbegrenzung zulässig ist. Ein Beispiel hierfür ist die Kombination zweier durchgehender Breitstriche auf dem mittleren Fahrstreifen einer dreistreifigen Richtungsfahrbahn.

Da der Reifen eine entscheidende Komponente für das längs-, quer- und vertikaldynamische Fahrzeugverhalten darstellt und abgesehen von Windkräften sämtliche Kräfte und Momente, die auf den Fahrzeugaufbau einwirken, in der Kontaktzone zwischen Reifen und Fahrbahn übertragen werden, ist der Kraftschlussbeiwert zusätzlich als potenzieller Einflussparameter auszuwählen. Diese auch als Reibwert μ bezeichnete Kenngröße definiert die Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn als Quotient von Reifenumfangskraft und Radlast.²¹⁰ Der Reibwert ist von diversen Einflussfaktoren wie der Radlast, der Temperatur, des Zwischenmediums oder der Fahrbahn abhängig.²¹¹ Zur Charakterisierung der Fahrbahnoberfläche können beispielsweise Messungen des in Kapitel 2.2.4 erläuterten OpenCRG-Formats dienen, welche in ein als OpenDRIVE-Datei vorliegendes Straßennetzwerk eingebunden werden können.²¹² Auf Basis der einschlägigen Literatur kann für den Reibwert μ ein Mindestreibwert von $\mu_{\min} = 0$ sowie ein maximaler Reibwert von $\mu_{\max} = 1.3$ für den zu erwarteten Wertebereich definiert werden.^{210,213,214}

²⁰⁹ Bagschik, G. et al.: *Ontology based Scene Creation for the Development of Automated Vehicles*, S. 5 ff.

²¹⁰ Hüsemann, T.: *Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn* (2007), S. 52 ff.

²¹¹ Klempau, F.: *Diss., Reibwertvorhersagesystem im fahrenden Fahrzeug* (2003), S. 14 ff.

²¹² VIRES Simulationstechnologie GmbH: *OpenDRIVE Format Specification* (2019), S. 88 f.

²¹³ Zhao, Y.-Q. et al.: *Estimation of Road Friction Coefficient* (2017), S. 984 ff.

²¹⁴ Winner, H.: *Tire*, S. 7 f.

4.2.2 Ebene 4: Bewegliche Objekte

Die Auswahl potenzieller Einflussparameter der beweglichen Objekte innerhalb eines Szenarios ist vom betrachteten funktionalen Szenario abhängig und wird nachfolgend für die im Rahmen dieser Arbeit definierten funktionalen Szenarien *Einscherer* und *Stauauflösung* erläutert. Auf Basis der Bewertung in Kapitel 3.3 bieten sich zur Auswahl potenzieller Einflussparameter der vierten Ebene der beweglichen Objekte des 6-Ebenen-Modells sowohl die Funktionsspezifikation des Testobjekts als auch Fahrmanöver und Fahrzeugkataloge an. Darüber hinaus können bestehende Veröffentlichungen, welche zum Teil auf Expertenwissen und Unfallanalysen beruhen, die Auswahl unterstützen.

Die Einschränkungen der Funktionsspezifikation in Bezug auf die ODD bilden den Ausgangspunkt für die Auswahl potenzieller Einflussparameter. Da die ODD auf autobahnähnliche Straßen beschränkt ist und Mautstationen, Tunnel, Unfallorte sowie Arbeitsstellen außerhalb der Funktionsspezifikation liegen, können die zu betrachtenden Verkehrsteilnehmer im Rahmen dieser Arbeit auf Pkw, Lkw und Krafträder beschränkt werden. Aus den Einschränkungen der DDT bezüglich der Längsdynamik lässt sich schlussfolgern, dass sowohl die Geschwindigkeit als auch die Art der beteiligten Verkehrsteilnehmer innerhalb eines funktionalen Szenarios potenzielle Einflussparameter darstellen. Die Auswahl dieser Einflussparameter lässt sich zusätzlich dadurch bekräftigen, dass sowohl die Geschwindigkeiten als auch die Art der Verkehrsteilnehmer Eingangsparameter bisheriger automatisierter Fahrfunktionen darstellen²¹⁵ und in Bezug auf HAF unter anderem für die Eigenzustandsschätzung sowie die Szenenmodellierung relevant sind.²¹⁶ Aus den neun von Tölle²¹⁷ definierten Basismanövern sind für die betrachteten funktionalen Szenarien die Manöver *Anfahren*, *Folgen*, *Annähern*, *Fahrstreifenwechsel* und *Parken* relevant, wobei Letzteres für den vorliegenden Anwendungsfall als Verzögerung in den Stillstand interpretiert wird. Da mehrere der genannten Basismanöver eine Beschleunigung des entsprechenden Fahrzeugs verlangen, wird die Beschleunigung in die Menge der potenziellen Einflussparameter aufgenommen. Aufgrund des Basismanövers *Folgen* wird der longitudinale Abstand zwischen beteiligten Verkehrsteilnehmern als potenzieller Einflussparameter ausgewählt, der ebenfalls Einflussparameter bestehender Fahrerassistenzsysteme ist.²¹⁵ Durch das Basismanöver *Fahrstreifenwechsel* werden zudem die Parameter des Einscherabstands sowie der Einscherdauer definiert. Der Vergleich mit bestehenden Veröffentlichungen^{218,219,220} zeigt auf, dass die genannten Einflussparameter mit in der Literatur festgelegten Einflussparametern in Einklang stehen. Zusätzlich wird durch den Vergleich eine genauere Spezifikation der Einflussparameter für die betrachteten funktionalen Szenarien möglich, wie nachfolgend näher beschrieben.

²¹⁵ Winner, H. et al.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme (2015), S. 855 ff.

²¹⁶ Lotz, F.: Diss., Referenzarchitektur für die automatisierte Fahrzeugführung (2017), S. 128 ff.

²¹⁷ Tölle, W.: Ein Fahrmanöverkonzept für einen maschinellen Kopiloten (1996), S. 32 ff.

²¹⁸ Amersbach, C.; Winner, H.: Functional decomposition (2019).

²¹⁹ ISO: 21448:2019 Road Vehicles -- Safety of the intended functionality (2019).

²²⁰ Gao, F. et al.: A test scenario automatic generation strategy (2019), S. 8 f.

Für den Fall des Szenarios *Einscherer* bei Betrachtung des Ego-Fahrzeugs und des einscherenden Fahrzeugs werden durch das PEGASUS-Projekt Einflussparameter definiert, welche eine Kompatibilität mit dem OpenSCENARIO-Format aufweisen²²¹, weshalb diese auch für den vorliegenden Anwendungsfall als relevant anzusehen sind. In der Veröffentlichung von Amersbach und Winner²²² werden, analog zu Abbildung 4-1, potenzielle Einflussparameter für das funktionale Szenario *Einscherer*, bei Berücksichtigung von Ego-Fahrzeug, Führungsfahrzeug und einscherendem Fahrzeug, definiert. Unter Betrachtung sämtlicher genannter Informationsquellen ergeben sich für die Ebene der beweglichen Objekte des funktionalen Szenarios *Einscherer* die in Tabelle 4-3 aufgeführten potenziellen Einflussparameter.

Tabelle 4-3: Potenzielle Einflussparameter der beweglichen Objekte für das funktionale Szenario *Einscherer*

Nr.	Parameter
1	Fahrzeugtyp Führungsfahrzeug (Obj 1)
2	Fahrzeugtyp Einscherer (Obj 2) ²²³
3	Initialgeschwindigkeit Einscherer
4	Initialgeschwindigkeit Ego + Obj 1
5	Finalgeschwindigkeit Einscherer
6	Initialdistanz Ego – Obj 1
8	Einscherabstand
9	Einscherdauer

In Tabelle 4-4 sind die ausgewählten, potenziellen Einflussparameter für das funktionale Szenario *Stauauflösung* dargestellt. Da innerhalb dieses Szenarios kein drittes (einscherendes) Fahrzeug vorhanden ist sind die durch dieses Fahrzeug bedingten Parameter ebenfalls nicht relevant. Für die Definition von Zeitpunkt und Art der Erfassung des jeweiligen Parameters beider funktionaler Szenarien im Rahmen der Verkehrssimulation sei auf den Prozessschritt der Analyse potenzieller Einflussparameter verwiesen. Teil der Analyse ist zudem die Ermittlung von Wertebereichen und Auftretenswahrscheinlichkeiten der ausgewählten Einflussparameter durch statistische Auswertungen.

Tabelle 4-4: Potenzielle Einflussparameter der beweglichen Objekte für das funktionale Szenario *Stauauflösung*

Nr.	Parameter
1	Fahrzeugtyp Führungsfahrzeug (Obj 1)
2	Initialgeschwindigkeit Ego+ Obj 1
3	Initialdistanz Ego – Obj 1
4	Beschleunigung Ego + Obj 1

²²¹ PEGASUS: The PEGASUS Method.

²²² Amersbach, C.; Winner, H.: Functional decomposition (2019).

²²³ Synonym für „einscherendes Fahrzeug“.

4.2.3 Ebene 5: Umweltbedingungen

Den Schwerpunkt der Betrachtungen der nachfolgenden Prozessschritte innerhalb der in Kapitel 3 entwickelten Methodik bilden die zuvor ausgewählten Einflussparameter der Straßenebene, Straßenausstattung und der beweglichen Objekte. Dies lässt sich aus der Tatsache heraus begründen, dass im vorhandenen Simulationsframework²²⁴ Fahrdynamik- und Fahrermodelle²²⁵ implementiert sind, welche eine statistische Auswertung der beweglichen Objekte motivieren. Zudem besteht durch die innerhalb des nachfolgenden Prozessschritts erläuterten OpenDRIVE-Dateien die Möglichkeit verschiedene Parameter der Straßenebene und Straßenausstattung statistisch auszuwerten. Innerhalb des vorhandenen Simulationsframeworks ist es durch die Fahrdynamiksimulationssoftware IPG CarMaker zwar möglich verschiedene Umweltbedingungen zu variieren, allerdings existiert keine Implementierung eines meteorologischen Modells und damit keine deterministische Grundlage zur statistischen Auswertung von Parametern der Ebene der Umweltbedingungen. Zur Ermöglichung der Quantifizierung von Parameterraum und Testumfang erfolgt dennoch eine Auswahl potenzieller Einflussparameter auf Grundlage bestehender Veröffentlichungen und Erläuterungen des Deutschen Wetterdienstes.

Innerhalb mehrerer Veröffentlichungen^{226,227, 228} sowie im Entwurf der Spezifikation des OpenSCENARIO-Formats²²⁹ wird bezüglich der Ebene der Umweltbedingungen zunächst in die Kategorien Wetter und Tageszeit unterschieden. Das OpenSCENARIO-Format gliedert die das Wetter bestimmenden Parameter in Art der Bewölkung, Art, Position und Intensität der Sonneneinstrahlung, Art etwaigen Nebels inklusive der Definition eines Sichtbereichs sowie Art und Intensität des vorliegenden Niederschlags.

Die Beschreibung der Umweltbedingungen in der Veröffentlichung von Amersbach und Winner²³⁰ erfolgt über die Definition der Parameter Sonnenposition, Niederschlag, Art der Bewölkung, Wind und Temperatur. Der Vergleich mit der vorliegenden OpenSCENARIO-Formatspezifikation der Version 0.9.1 führt zur Annahme einer identischen Definition des Parameters der Art der Bewölkung, da jeweils in fünf Diskretisierungsstufen unterschieden wird. Zudem war die Weiterentwicklung des OpenSCENARIO-Formats Teil des PEGASUS-Projekts, in dessen Rahmen auch die genannte Veröffentlichung von Amersbach und Winner entstanden ist. Während die OpenSCENARIO-Formatspezifikation den Parameter der Sonneneinstrahlung sowie des Niederschlags nochmals in weitere Parameter unterteilt, denen jeweils Diskretisierungsstufen zugeordnet werden, erfolgt die Definition durch Amersbach und Winner in Form des Parameters Sonnenposition und Niederschlag weniger granular. Die durch Amersbach und Winner in Form von Wind und Temperatur definierten Parameter sind

²²⁴ Hallerbach, S. et al.: Simulation-Based Identification of Critical Scenarios (2018), S. 3 ff.

²²⁵ Behrisch, M. et al.: SUMO - Simulation of Urban MObility.

²²⁶ ISO: 21448:2019 Road Vehicles -- Safety of the intended functionality (2019).

²²⁷ Bagschik, G. et al.: Wissensbasierte Szenariengenerierung (2018), S. 6 f.

²²⁸ Gao, F. et al.: A test scenario automatic generation strategy (2019), S. 8.

²²⁹ VIRES Simulationstechnologie GmbH: OpenSCENARIO Formatspezifikation v0.9.1 (2017).

²³⁰ Amersbach, C.; Winner, H.: Functional decomposition (2019).

nicht in der vorliegenden OpenSCENARIO-Formatspezifikation enthalten. Die Kategorie der die Tageszeit betreffenden Einflussparameter wird von Amersbach und Winner nicht explizit definiert. Dies ist schlüssig, da nicht die Änderung der Tageszeit selbst als relevanter Einflussparameter auf die Funktionalität einer höher automatisierten Fahrfunktion anzusehen ist. Als relevant einzuordnen sind die, mit einer sich verändernden Tageszeit einhergehenden, Änderungen von Einflussparametern wie der Sonnenstand oder die Umgebungshelligkeit.²³¹

Da im Rahmen der vorliegenden Arbeit im gegebenen Simulationsframework keine systematische Ableitung der Einflussparameter der Umweltbedingungen möglich ist, wird die Definition von Amersbach und Winner übernommen. Neben dem Vergleich mit der OpenSCENARIO-Formatspezifikation sei darauf hingewiesen, dass der Deutsche Wetterdienst zur Beschreibung von Wetter und Klima ebenfalls die Parameter Bedeckungsgrad durch Wolken, Temperatur, Niederschlagsform, Sonnenscheindauer und Windverhältnisse verwendet.²³² Der Deutsche Wetterdienst unterteilt verschiedene Parameter im Vergleich zu Amersbach und Winner, wie auch die OpenSCENARIO-Formatspezifikation, nochmals feiner. Exemplarisch genannt sei die Unterteilung des Parameters Windverhältnisse in Windgeschwindigkeit und Windrichtung.

4.2.4 Zusammenfassung

In Tabelle 4-5 sind die ausgewählten Einflussparameter der exemplarisch betrachteten funktionalen Szenarien *Einscherer* und *Stauauflösung* in Anlehnung an das 6-Ebenen-Modell zusammengefasst. Die Strukturierung der Einflussparameter nach dem 6-Ebenen-Modell eignet sich für die Repräsentation in einer Ontologie und die automatisierte Generierung von funktionalen Szenarien.²³³ Innerhalb der Tabelle repräsentieren die Zellen mit einem Kreuz für das entsprechende funktionale Szenario relevante Einflussparameter, wohingegen Zellen, die mit einem Querstrich versehen sind, für das entsprechende Szenario nicht relevante Parameter darstellen.

Tabelle 4-5: Ausgewählte potenzielle Einflussparameter für betrachtete funktionalen Szenarien²³⁴

Ebene	Parameter p_i	Funktionales Szenario	
		Einscherer	Stauauflösung
1 Straßenebene	Breite Fahrstreifen 1	×	×
	Breite Fahrstreifen 2	×	-
	Kurvenkrümmung	×	×
	Kraftschlussbeiwert	×	×
	Längsneigung	×	×
	Querneigung	×	×
2 Straßenaus- stattung	Fahrstreifenmarkierungstyp links	×	×
	Fahrstreifenmarkierungstyp rechts	×	×

²³¹ Aouini, R.: Masterthesis, Reduktionspotential funktionale Dekomposition (2018), S. 32–34.

²³² DWD: Climate Data Center.

²³³ Bagschik, G. et al.: Wissensbasierte Szenariengenerierung (2018), S. 5.

²³⁴ Amersbach, C.; Winner, H.: Functional decomposition (2019).



4 Bewegliche Objekte	Fahrzeugtyp Führungsfahrzeug (Obj 1)	×	×
	Fahrzeugtyp Einscherer (Obj 2)	×	-
	Initialgeschwindigkeit Einscherer	×	-
	Initialgeschwindigkeit Ego + Obj 1	×	×
	Finalgeschwindigkeit Einscherer	×	-
	Initialdistanz Ego – Obj 1	×	×
	Einscherabstand	×	-
	Einscherdauer	×	-
	Beschleunigung Ego + Obj 1	-	×
5 Umwelt- bedingungen	Sonnenposition	×	
	Niederschlag	×	
	Bewölkung	×	
	Wind	×	
	Temperatur	×	

4.3 Analyse potenzieller Einflussparameter

Auf Grundlage der Ergebnisse des vorherigen Prozessschritts in Form der ausgewählten, potenziellen Einflussparameter wird in diesem Kapitel eine Analyse dieser Einflussparameter aufgezeigt. Dabei steht übergeordnet die Darstellung der Anwendbarkeit der in Kapitel 3 entwickelten Methodik im Fokus. Die möglichen Vorteile der Anwendung der Methode der statistischen Auswertung auf Basis einer Verkehrssimulation für die Parameter der beweglichen Objekte werden in der Literatur genannt²³⁵, eine veröffentlichte praktische Umsetzung dieses Ansatz ist zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Arbeit allerdings nicht bekannt. Die Vorteile der Simulation liegen zum einen in einer weniger zeit- und kostenintensiven Umsetzung der Datengenerierung im Vergleich zu Messfahrten im realen Straßenverkehr. Zum anderen besteht die Problematik der subjektiven Sicht auf eine Szene bei realer Messfahrt im Falle der Überführung der Messfahrt in die Simulation nicht, da diese eine objektive Sicht auf die Szene erlaubt.²³⁶ Überdies ist die Verkehrssimulation nicht auf die Abbildung des derzeitigen Zustands des Straßenverkehrs beschränkt, da die Möglichkeit der Variation verschiedener Parameter gegeben ist. So kann beispielsweise ein zukünftiger Verkehrszustand mit signifikanter Durchdringung höher automatisierter Fahrzeuge modelliert werden. Die Qualität der Auswertung hängt weiterhin von der Qualität der zu Grunde liegenden Daten ab, die sich durch das verfügbare Straßennetzwerk im OpenDRIVE-Format sowie die durch die Verkehrssimulation generierten Daten darstellen. Die aus der Verkehrssimulation resultierenden Daten hängen wiederum von der Qualität der innerhalb der Verkehrssimulation implementierten Modelle ab.

Aus den genannten Gründen und vor dem Hintergrund des Anwendungsfalls des Traffic-Jam-Chauffeurs erfolgt im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Implementierung einer stochastischen Verkehrssimulation für Stausituationen²³⁷ auf Autobahnen. Diese ermöglicht es die Wertebereiche und Auftretenswahrscheinlichkeiten sämtlicher ausgewählter Einflussparameter der beweglichen Objekte für die exemplarischen funktionalen Szenarien *Einscherer* und *Stauauflösung* zu ermitteln.

Die Plausibilisierung dieser Verkehrssimulation durch den Vergleich von im realen Straßenverkehr aufgezeichneten Daten mit in der Simulation generierten Daten anhand makroskopischer Verkehrsmetriken bildet die Grundlage für die statistische Auswertung exemplarischer Einflussparameter. Über die Darstellung der Anwendbarkeit der Methode der statistischen Auswertungen im vorhandenen Simulationsframework hinaus, werden im Laufe der Bearbeitungszeit als relevant erscheinende Fragestellungen näher untersucht. Hierzu zählt eine Betrachtung des Einflusses unterschiedlicher Durchdringungsgrade automatisierter Fahrzeuge auf die Wertebereiche und Auftretenswahrscheinlichkeiten ausgewählter Einflussparameter innerhalb der Verkehrssimulation.

²³⁵ Puetz, A. et al.: Database of relevant traffic scenarios (2017), S. 2 ff.

²³⁶ Ulbrich, S. et al.: Defining Scene, Situation and Scenario (2015), S. 2.

²³⁷ Vgl. Kap. 4.3.1.2 (Plausibilisierung).

4.3.1 Stochastische Verkehrssimulation für Stausituationen auf Autobahnen

Nachfolgend wird die Implementierung und Parametrierung der stochastischen Verkehrssimulation für Stausituationen auf Autobahnen innerhalb des Simulationsprogrammes *Simulation of Urban Mobility*²³⁸ beschrieben. Zudem erfolgt eine Erläuterung der Plausibilisierung der Implementierung anhand makroskopischer Verkehrsmetriken.

4.3.1.1 Implementierung und Parametrierung

Das zentrale Ziel der Implementierung der Verkehrssimulation ist die Abbildung eines für die betrachtete Fahrfunktion plausiblen Verkehrszustands in Form von Stausituationen auf Autobahnen. Bei der Abbildung eines solchen Verkehrszustands wird angenommen, dass die entstehenden Wertebereiche und Auftretenswahrscheinlichkeiten der ausgewählten potenziellen Einflussparameter sich in der Weise äußern, wie sie beim Serieneinsatz des Testobjekts tatsächlich auftreten.

Das im Rahmen dieser Arbeit genutzte Straßennetzwerk stellt ein vom Unternehmen Atlatec in hoher Auflösung vermessener Teil des Verkehrskreuzes Frankfurt dar. Dieses steht im OpenDRIVE-Format zur Verfügung, wodurch eine Kompatibilität mit SUMO und dem Framework AXIOM gegeben ist. In Abbildung 4-4 sind die vermessenen Straßenabschnitte innerhalb der Benutzeroberfläche von SUMO aufgezeigt. Im Rahmen dieser Arbeit wird die für die Datengenerierung relevante Stausituation zwischen den Punkten A und B erzeugt. Der korrespondierende Abschnitt der Autobahn 3 misst 3722 m der Fahrbahn in Richtung Offenbacher Kreuz (Fahrtrichtung B). Während für das funktionale Szenario *Einscherer* der gesamte Abschnitt zur Datengenerierung genutzt wird ist zur Auswertung des funktionalen Szenarios *Stauauflösung* nur ein Teilabschnitt relevant, wie in Kapitel 4.3.1.2 näher erläutert.

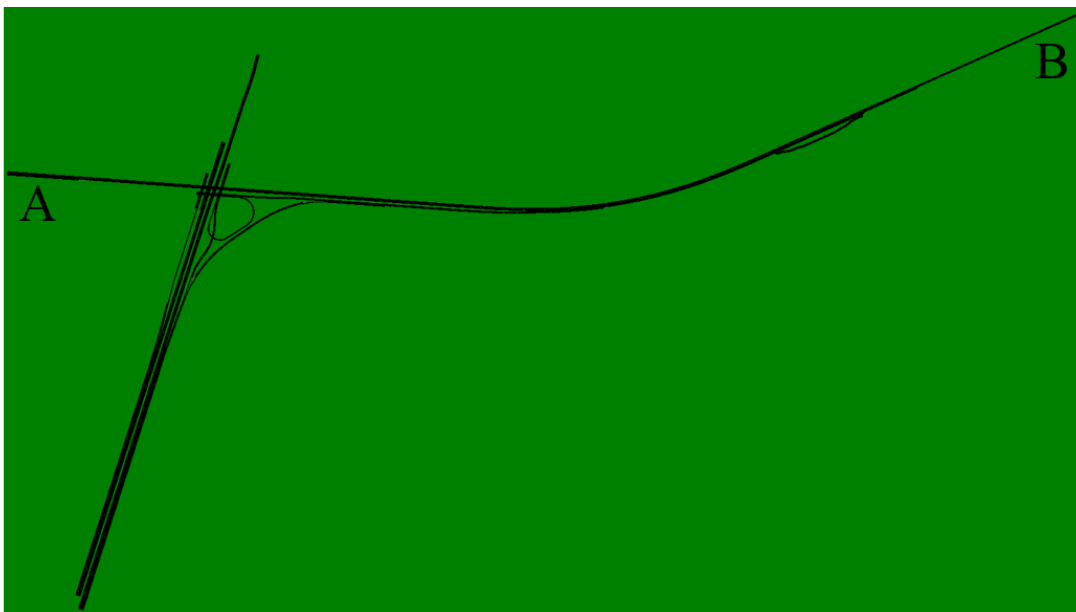


Abbildung 4-4: Für die Verkehrssimulation verfügbares Straßennetzwerk (Ausschnitt des Verkehrskreuzes Frankfurt)

²³⁸ Behrisch, M. et al.: SUMO - Simulation of Urban MObility.

Die Definition des Verkehrsaufkommens erfolgt auf Basis der Dauerverkehrszählung der automatischen Zählstellen der BAST aus dem Jahr 2016. Als für den betrachteten Streckenabschnitt relevant werden die Dauerzählstellen Mörfelden-Walldorf (BAST-Nr. 6825) und Frankfurt-Niederrad (BAST-Nr. 6923) der Autobahn 5 sowie die Dauerzählstelle Frankfurter Kreuz (BAST-Nr. 6856) der Autobahn 3 angesehen.²³⁹ Da das Ziel der Verkehrssimulation das Abbilden eines für den TJC relevanten Verkehrszustands ist, wird innerhalb der Verkehrszählung das Verkehrsaufkommen an Werktagen zwischen 15 Uhr und 19 Uhr betrachtet, weil der durchschnittliche Verkehrsfluss in Form von Fahrzeugen, welche die Zählstelle pro Stunde passieren, während diesem Zeitraum am höchsten ist. Die Statistik ermöglicht eine Unterscheidung zwischen Pkw, Lkw und Krafträdern, sodass die Definition des fahrzeugtypspezifischen Verkehrsaufkommens innerhalb SUMO darstellbar ist. Bei der Definition des fahrstreifenspezifischen Verkehrsaufkommens liegt die Annahme zu Grunde, dass sich im Falle von An- und Abzweigungen verschiedener Fahrstreifen einer Richtungsfahrbahn nach der jeweiligen Zählstelle das Verkehrsaufkommen im Verhältnis der Fahrstreifenanzahl aufteilt. Teilt sich beispielsweise eine vierstreifige Richtungsfahrbahn nach einer automatischen Zählstelle in eine dreistreifige und eine einstreifige Richtungsfahrbahn auf wird angenommen, dass $\frac{3}{4}$ des von der automatischen Zählstelle erfassten Verkehrsaufkommens auf der dreistreifigen Fahrbahn verbleibt, während $\frac{1}{4}$ des Verkehrsaufkommens die einstreifige Fahrbahn nutzt. Diese Annahme wird getroffen, da weniger Verkehrszählstellen als An- oder Abzweigungen existieren.

In SUMO sind verschiedene Modelle implementiert, welche das longitudinale und laterale kinematische Verhalten der in der Simulation befindlichen Fahrzeuge beschreiben. Für die betrachteten funktionalen Szenarien und vor dem Hintergrund des Anwendungsfalls des TJC sind sowohl das *Car-following model* als auch das *Lane-changing model* für die Lösung der vorliegenden Aufgabenstellung relevant. Das *Car-following model* bestimmt Geschwindigkeit und Abstand des Fahrzeugs in longitudinaler Richtung in Relation zum vorausfahrenden Fahrzeug. Das in SUMO als Standard verwendete *Car-following model* basiert auf dem in der Dissertation von Krauss²⁴⁰ entwickelten mikroskopischen Modell des Verkehrsflusses. Für in der Implementierung von SUMO getroffene Abänderungen sei auf die Dokumentation²⁴¹ verwiesen. Dieses Modell wird für die Simulationen der vorliegenden Arbeit verwendet, insofern nicht anders beschrieben. Von der Benutzung dieses Modells abgewichen wird beispielsweise bei der Analyse des Einflusses unterschiedlicher Durchdringungsgrade höher automatisierter Fahrzeuge innerhalb der Verkehrssimulation, deren Verhalten durch Implementierung des ACC-Modells als *Car-following model* angenähert wird. Das *Lane-changing model* bestimmt die Wahl des Fahrstreifens des jeweiligen Fahrzeugs auf mehrstreifigen Fahrbahnen sowie etwaige Geschwindigkeitsanpassungen im Falle eines Fahrstreifenwechsels und ist mit dem *Car-following model* gekoppelt. Es unterscheidet auf Basis vier hierarchisch angeordneter Ebenen in verschiedene Motivationen des Fahrstreifenwechsels. Durch Erweiterung des Modells in Form des *Sublane-Models* besitzen die Fahrzeuge unter anderem die Fähigkeit einer situationsspezifischen

²³⁹ BAST: Automatische Verkehrszählstellen 2016.

²⁴⁰ Krauß, S.: Diss., Microscopic Modeling of Traffic Flow (1998).

²⁴¹ DLR: SUMO User Documentation.

lateralen Geschwindigkeitwahl während des Fahrstreifenwechsels, weshalb dieses als *Lane-changing model* innerhalb der vorliegenden Arbeit implementiert wird.

Abhängig vom verwendeten *Car-following model* und *Lane-changing model* ist in SUMO eine anwenderspezifische Parametrierung möglich. Tabelle 4-6 zeigt die gewählten fahrzeugtypspezifischen Anpassungen der Parameter innerhalb der genannten Modelle. Für die nicht dargestellten, von SUMO als Standard definierten, und im Rahmen dieser Arbeit für die Simulation verwendeten Parameter sei auf die Dokumentation²⁴² verwiesen. Bei der Betrachtung des Einflusses unterschiedlicher Durchdringungsgrade höher automatisierter Fahrzeuge innerhalb der Verkehrssimulation erfolgt eine Abänderung der Parametrierung des *Lane-changing models*.

Tabelle 4-6: Fahrzeugtypspezifische Parametrierung der implementierten Modelle in SUMO

Parameter	Beschreibung	Fahrzeugtyp											
		Pkw				Lkw				Krafttrad			
		E	s^2	Min	Max	E	s^2	Min	Max	E	s^2	Min	Max
accel	Beschleunigungsvermögen in m/s^2	2.9	0.4	1.8	7.8	1.15	0.1	0.95	1.4	3.5	1.5	1.1	8.7
decel	Verzögerungsvermögen in m/s^2	7.5	0.2	7	9	4	0.1	3.7	4.3	8.5	0.75	7	10
tau	Minimale Zeitlücke in s	1.0	0.2	0.7	1.5	1.0	0.2	0.7	1.5	1.0	0.2	0.7	1.5
sigma	Unvollkommenheit des Fahrendens	0.5	0.1	0.2	0.8	0.5	0.1	0.2	0.8	0.5	0.1	0.2	0.8
length	Länge des Fahrzeugs in m	5	0.2	3.5	6.5	14	3	7	19	2.15	0.05	2.0	2.25
minGap	Minimaler Abstand in m	2.5	0.2	1.5	3.5	2.5	0.2	1.5	3.5	2.5	0.2	1.5	3.5
max-Speed	Höchstgeschwindigkeit in m/s	55.6	7	45	85	25	-	-	-	55.6	7	45	85
speed-Factor	Multiplikationsfaktor Geschwindigkeitsbegrenzung	1.0	0.15	0.7	1.5	1.0	0.15	0.7	1.5	1	0.15	0.7	1.5
width	Fahrzeugbreite in m	1.95	0.15	1.7	2.2	2.5	0.1	2.3	2.55	0.85	0.05	0.7	1
lcAssertive	Akzeptanz niedrigerer Abstände auf Zielfahrstreifen	1.25	0.13	1	1.5	1.25	0.13	1	1.5	1.25	0.13	1	1.5
lcPushy	Akzeptanz lateraler Annäherung	0.3	0.15	0	0.6	0.3	0.15	0	0.6	0.3	0.15	0	0.6

²⁴² DLR: SUMO User Documentation.

Das Ziel der Verkehrssimulation ist das Erzeugen eines für die betrachtete Fahrfunktion relevanten Verkehrszustands auf dem betrachteten Streckenabschnitt. Damit geht die Forderung einher die stochastischen Charakteristika des Straßenverkehrs abzubilden. Ein Einflussparameter der Qualität der Abbildung dieses Prozesses besteht in der Modellierung der Verteilung verschiedener Verkehrsteilnehmer. Zur Erfüllung dieser Forderung werden in der vorliegenden Arbeit die in Tabelle 4-6 dargestellten Parameter mit den entsprechenden Erwartungswerten, Standardabweichungen und Grenzwerten als über die Flotte des jeweiligen Fahrzeugtyps normalverteilt angenommen. Die Implementierung im Rahmen dieser Arbeit definiert je Fahrzeugtyp 10000 Varianten, die jeweils durch eine zufällige Parameterkombination der in der Tabelle dargestellten Parameter sowie weitere nicht abgeänderte Parameterwerte definiert sind. Bei Einsatz eines Fahrzeugs in die Simulation definiert SUMO die Fahrzeugparameter fahrzeugtypspezifisch aus der jeweiligen Variantenliste.

Bei den Parametern des minimalen Abstands zum vorausfahrenden Fahrzeug (*minGap*), der minimalen Zeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug (*tau*), der Unvollkommenheit des Fahrenden²⁴² (*sigma*) sowie dem Multiplikationsfaktor der aktuellen Geschwindigkeitsbegrenzung (*speedFactor*), welche die vom entsprechenden Fahrzeug akzeptierte Geschwindigkeitsüberhöhung definiert, werden die jeweiligen Default-Werte aus SUMO als Erwartungswert der entsprechenden Normalverteilung angenommen. Zusätzlich werden Standardabweichungen und Grenzwerte mit dem Ziel der Abbildung einer realistischen Flottenbeschreibung geschätzt. Bezüglich der Parameter des maximalen Beschleunigungsvermögens (*accel*), des maximalen Verzögerungsvermögens (*decel*), der Länge des Fahrzeugs (*length*) sowie der Breite des Fahrzeugs (*width*) werden die jeweiligen Default-Werte aus SUMO als Erwartungswert der entsprechenden Normalverteilung angenommen. Im Falle einer weiteren Differenzierung eines Fahrzeugtyps durch SUMO – beispielsweise wird die Aufbauform nochmals in Limousine, Van etc. unterschieden – wird das arithmetische Mittel der aufgeführten Parameterwerte herangezogen. Die Definition der Standardabweichungen und Grenzwerte erfolgt auf Grundlage der in der SUMO-Dokumentation genannten Werte sowie durch Schätzung. Für den Parameter der Höchstgeschwindigkeit (*maxSpeed*) werden für Pkw und Krafträder ebenfalls die Default-Werte aus SUMO als Erwartungswert der entsprechenden Normalverteilung definiert. Für Lkw wird die Höchstgeschwindigkeit zu 25 m/s definiert. Der Parameter *lcAssertive* beschreibt durch einen Multiplikationsfaktor die Akzeptanz niedrigerer Abstände zum vorausfahrenden Fahrzeug sowie zum Folgefahrzeug auf dem Zielfahrstreifen bei geplantem Fahrstreifenwechsel. Es wird angenommen, dass Fahrzeuge beim Fahrstreifenwechsel durchschnittlich um 25 % geringere Abstände auf dem Zielfahrstreifen akzeptieren, bei minimal halbem akzeptierten Abstand und maximal gleichem Abstand im Vergleich zum Ausgangsfahrstreifen. Die Akzeptanz bereits einen Fahrstreifenwechsel einzuleiten, obwohl sich zum entsprechenden Zeitpunkt noch ein Fahrzeug auf dem Zielfahrstreifen innerhalb der geplanten Trajektorie befindet wird durch den Parameter *lcPushy* beschrieben. Der Erwartungswert dieses Parameters wird zu $E = 0.3$ angenommen, wobei die Skala von null bis eins reicht und eins ein aggressives Verhalten repräsentiert. Die Grenzwerte der Verteilung sind in der vorliegenden Simulation durch null als sehr passives und 0.6 als aggressiveres Verhalten definiert.

Das vorliegende Straßennetzwerk wird durch SUMO automatisiert in Straßensegmente eingeteilt, innerhalb derer Art und Zeitpunkt des Einbringens von Fahrzeugen in die Simulation definierbar sind.

Um die Forderung der Abbildung der stochastischen Charakteristika des Straßenverkehrs zu erfüllen, wird für die erzeugten Varianten je Fahrzeugtyp entsprechend ihres, auf der Verkehrszählung der BAST basierenden, Verkehrsaufkommens eine Wahrscheinlichkeit definiert, mit welcher ein Fahrzeug pro Sekunde in den Verkehr eingebracht wird. Während für Pkw und Krafträder die Annahme getroffen wird, dass diese sich in identischen Mengenverhältnissen auf die vorhandenen Fahrstreifen verteilen, werden Lkw immer auf dem rechten Fahrstreifen eingesetzt. Alle Fahrzeuge werden im ersten Straßensegment des entsprechenden Straßenabschnitts eingesetzt, wobei nur solche Routen innerhalb der Simulation definiert werden, die in der Realität unter Beachtung der StVO zum Erreichen des Punktes B (siehe Abbildung 4-4) führen. Die Position der Einbringung in den Verkehr erfolgt jeweils zufällig im ersten Straßensegment. Ist die ausgewählte Position belegt wird das Fahrzeug an einer freien Position des ersten Straßensegments in den Verkehr eingebracht. Für das funktionale Szenario *Einscherer* wird die Geschwindigkeitsbegrenzung innerhalb des betrachteten Streckenabschnitts zu 60 km/h definiert. Zusätzlich wird für die letzten 873 m des betrachteten Straßenabschnitts eine Fahrstreifensperrung des rechten Fahrstreifens implementiert, um den geforderten Verkehrszustand zu erreichen. Zur Darstellung des funktionalen Szenarios *Stauauflösung* wird nach 2518 m eine 35 m lange Fahrbahnverengung implementiert. Die Geschwindigkeitsbegrenzung der nachfolgenden Streckenabschnitte wird zu 100 km/h definiert, wobei im gesamten für die Datenauswertung relevanten Streckenabschnitt ein Beschleunigen der Fahrzeuge stattfindet und dies damit zur Auflösung der Stausituation führt.

In SUMO ist der Mersenne Twister Algorithmus als Pseudozufallszahlengenerator implementiert. Für einen festgelegten Startwert erfolgt die Erzeugung der Zufallszahlen deterministisch. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird der Default-Wert 23423 genutzt, um die makroskopische Anforderung der Reproduzierbarkeit zu erfüllen. Es wird darauf hingewiesen, dass dieser Startwert innerhalb der Simulation in SUMO variierbar ist und so tatsächlich zufälliges, nicht reproduzierbares Verhalten darstellbar ist. Da SUMO ein ausschließlich die Kinematik abbildendes Simulationsprogramm darstellt ist eine Implementierung variabler Umweltbedingungen nicht möglich. Tabelle 4-7 fasst die Implementierung und Parametrierung der stochastischen Verkehrssimulation für Stausituationen auf Autobahnen in Anlehnung an das 6-Ebenen-Modell zusammen.

Tabelle 4-7: Zusammenfassung der Implementierung & Parametrierung

Ebene	Kategorie	Beschreibung
Straßennetzwerk und Straßenausstattung	Vorliegender Straßenabschnitt	Teilvermessung des Verkehrskreuzes Frankfurt im OpenDRIVE-Format durch Atlatec
	Für Analyse relevante Länge	3722 m
Bewegliche Objekte	Fahrzeugtypen	Pkw, Lkw, Krafträder
	Verkehrsaufkommen pro Fahrzeugtyp	Basierend auf Verkehrszählung der BAST
	Varianten pro Fahrzeugtyp	10000
	Parameterverteilungen verschiedener Varianten	Normalverteilt mit definierten Grenzwerten
Umweltbedingungen	Betrachtungsrahmen	Außerhalb von SUMO

4.3.1.2 Plausibilisierung

Zur Plausibilisierung der durch die Verkehrssimulation erzeugten Daten erfolgt ein Vergleich mit im realen Straßenverkehr aufgezeichneten Daten anhand makroskopischer Verkehrsmetriken. Der Straßenverkehr ist ein komplexes System, welches aus einer hohen Anzahl individueller Agenten besteht, welche miteinander interagieren. Eine direkte Modellierung des Verkehrszustands auf Basis mikroskopischer Details, welche die Bewegung der individuellen Fahrzeuge (Fz) erfasst stellt eine Herausforderung dar. Es gibt jedoch Eigenschaften des Verkehrszustands, welche nicht von untergeordneten Prozessen abhängen. Unter der Annahme, dass die Durchschnittsgeschwindigkeit \bar{v} in einem lokal homogenen Verkehrszustand mit steigender Verkehrsdichte ρ , welche die Anzahl von Fahrzeugen pro Längeneinheit angibt, abnimmt, lässt sich der durchschnittliche Verkehrsfluss J in Fahrzeugen pro Zeiteinheit herleiten, wie in Formel (4-1) aufgezeigt.

$$J(\rho) = \rho \bar{v}(\rho) \quad (4-1)$$

Die Funktion $J(\rho)$ ist für $\rho = 0$ sowie für $\rho = \rho_{\max}$ gleich null und weist ein Maximum bei einer mittleren Dichte auf. Für kleine Dichten ist die Steigung der Funktion durch die Geschwindigkeit der Verkehrsteilnehmer bestimmt. Die gebräuchliche Darstellung der Funktion $J(\rho)$ wird als Fundamentaldiagramm bezeichnet. Für tiefergehende Erläuterungen zur Herleitung der Funktion sei auf die Literatur verwiesen.²⁴³

Um die Validität eines Verkehrsmodells zu analysieren müssen weitere dynamische Eigenschaften des Modells mit dynamischen Eigenschaften in der Realität auftretender Phänomene des Straßenverkehrs verglichen werden. Die Analyse eines Modells unter Nutzung des Fundamentaldiagramms kann als Ausgangspunkt weiterer Analysen dienen und gibt erste Hinweise in Hinblick auf die Modellvalidität.²⁴³ Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt nicht auf der Entwicklung eines möglichst validen Verkehrsmodells, sondern auf der Entwicklung und Anwendung einer Methodik zur systematischen Auswahl logischer Szenarien sowie deren Überführung in konkrete Szenarien. Da die Validität der Verkehrssimulation einen signifikanten Einfluss auf Wertebereiche und Auftretenswahrscheinlichkeiten der zu analysierenden Einflussparameter aufweist, wird zu deren Analyse im Rahmen dieser Arbeit das Fundamentaldiagramm verwendet und als hinreichend angesehen. Für nachfolgende Arbeiten auf diesem Gebiet sei dennoch auf die Wichtigkeit tiefergehender Analysen hinsichtlich der Modellvalidität hingewiesen.

In Abbildung 4-5 sind links auf Festdetektormessungen basierende Realdaten der Autobahn 1 in der Darstellung als Fundamentaldiagramm aufgezeigt.²⁴⁴ Innerhalb der Abbildung sind die drei grundsätzlich im Straßenverkehr beobachtbaren Zustände den betreffenden Bereichen im Fundamentaldiagramm zugeordnet. Die geringste Komplexität hinsichtlich der Beschreibung im Fundamentaldi-

²⁴³ Krauß, S.: Diss., Microscopic Modeling of Traffic Flow (1998), S. 5 ff.

²⁴⁴ Neubert, L.: Diss., Statistische Analyse von Verkehrsdaten (2000), S. 20 ff.

gramm weist der frei fließende Verkehr auf. Charakteristikum dieses Zustands ist die, in einem ausgedehnten Dichtebereich vorliegende, lineare Abhängigkeit des Flusses von der Dichte bis hin zu einer Dichte, an welcher der maximale Fluss erreicht wird. Innerhalb dieses Intervalls definiert die durchschnittliche Geschwindigkeit die Steigung der entsprechend aufgezeichneten Verkehrszustände. Bei Überschreiten einer kritischen Dichte kommt es zu einem deutlichen Geschwindigkeitseinbruch und es resultiert der Zustand synchronisierten Verkehrs. Dieser kann weiter in drei verschiedene Arten unterschieden werden. Der synchronisierte Zustand ist durch mittlere Dichten sowie mittlere Flüsse charakterisiert und deckt im Fundamentaldiagramm eine Fläche ab. Es handelt sich dabei um einen komplexen Zustand, innerhalb welchem es zu zufälligen Übergängen in der ρ - J -Ebene kommen kann. Dieser Zustand zeichnet sich durch wenige Fahrstreifenwechsel, geringe Geschwindigkeitsunterschiede und einer im Vergleich zum freifließenden Verkehr geringeren Durchschnittsgeschwindigkeit aus. Im Bereich von Stop-and-Go Verkehr, welcher abhängig von der zugrunde liegenden Quelle auch als Stau beschrieben ist, wird der Fluss durch die Dichte kontrolliert. Dieser Zustand lässt sich im Allgemeinen durch einen Einbruch von sowohl der Durchschnittsgeschwindigkeit als auch dem Fluss einordnen. In der Darstellung im Fundamentaldiagramm kann der Stop-and-Go Verkehr nach Formel (4-1) bis in den Koordinatenursprung reichen, insofern die Dichte aus aufgezeichnetem Fluss und Durchschnittsgeschwindigkeit berechnet wird.²⁴⁵ Es sei darauf hingewiesen, dass diese, von der Messmethode abhängige Problematik, in Abbildung 4-5 links auftritt und sich der Stop-and-Go Verkehr durch hohe Dichten bei niedrigen Flüssen auszeichnet. Im Rahmen dieser Arbeit werden Verkehrszustände im Bereich des Stop-and-Go Verkehrs sowie im Bereich synchronisierten Verkehrs bei Durchschnittsgeschwindigkeiten $\bar{v} \leq 60$ km/h als Stausituation definiert.

In Abbildung 4-5 rechts ist die Aufzeichnung eines Staus im realen Straßenverkehr im Fundamentaldiagramm dargestellt, wobei der Fluss in diesem Fall, abweichend von der bisherigen Definition, durch das Formelzeichen q beschrieben ist. Die mit den Zahlen 1 bis 12 versehenen Datenpunkte korrespondieren jeweils zu einer Aufzeichnung des Staus von einer Minute. Die Datenpunkte 4,5 und 6 entstehen aus Aufzeichnungen über jeweils ein Zeitintervall von drei Minuten, um eine genau Dichtebestimmung auch bei niedrigen Flüssen zu erreichen. Die Linie I beschreibt das Verhalten, mit welchem sich die abfließende Front des Staus im Durchschnitt organisiert.

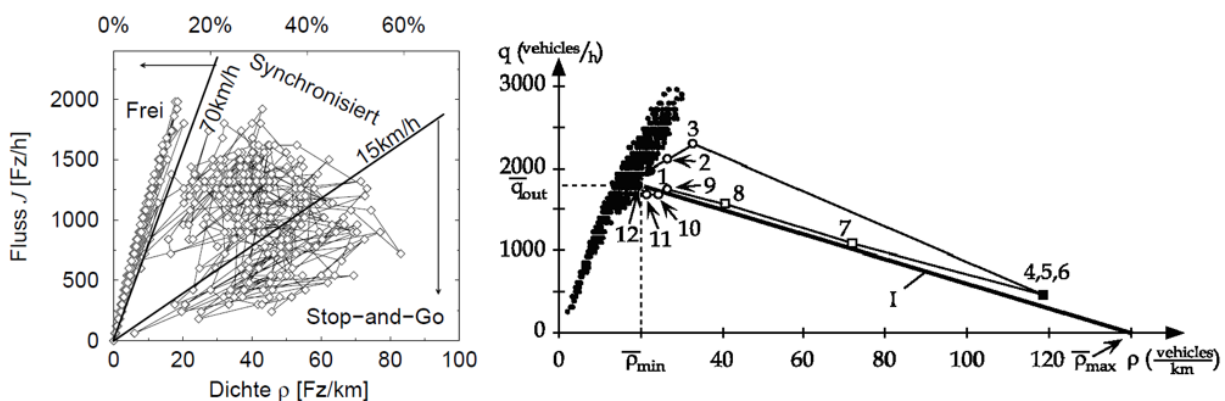


Abbildung 4-5: Die verschiedenen Zustände des Verkehrs (links)²⁴⁵ sowie Aufzeichnung eines Staus (rechts)²⁴³

²⁴⁵ Neubert, L.: Diss., Statistische Analyse von Verkehrsdaten (2000), S. 4 ff.

Aus den vorherigen Erläuterungen ergeben sich für die vorliegende Verkehrssimulation mehrere Erkenntnisse. Durch die als *Traffic-Jam-Chauffeur* bezeichnete Fahrfunktion, welche im Rahmen der vorliegenden Arbeit betrachtet wird lässt sich zunächst ableiten, dass der Zustand des Stop-and-Go Verkehrs relevant ist. Durch die Funktionsspezifikation ist zusätzlich der für die Fahrfunktion relevante Geschwindigkeitsbereich von 0-60 km/h definiert. Da sich der Bereich des Stop-and-Go Verkehrs einer Durchschnittsgeschwindigkeit $\bar{v} < 15$ km/h zuordnen lässt ist der Zustand synchronisierten Verkehrs bei Geschwindigkeiten $\bar{v} \leq 60$ km/h zusätzlich als relevant anzusehen. Dies lässt sich zum einen durch dessen sich aus Abbildung 4-5 links ergebenden Geschwindigkeitsbereich und zum anderen durch dessen zuvor angesprochene Charakteristika begründen. Zusätzlich lässt sich ableiten, dass für die Darstellung eines für die Fahrfunktion relevanten Verkehrszustands eine Verteilung der aus der Simulation resultierenden Datenpunkte anzustreben ist, welche in ihrer Form die aufgezeichnete Stausituation aus Abbildung 4-5 rechts annähert.

In Abbildung 4-6 sind die aus der Simulation erhaltenen Verkehrszustände für das funktionale Szenario *Einscherer* dargestellt. Zur Erstellung der Daten wird der Verkehrszustand des in zehn Straßen-segmente aufgeteilten, betrachteten Straßenabschnitts in Form von Durchschnittsgeschwindigkeit und Dichte ermittelt. Das Zeitintervall zur Ermittlung jedes Datenpunkts beträgt drei Minuten. Der Verkehrsfluss wird über Formel (4-1) bestimmt und die Simulationsdauer beträgt 45 Minuten.

Der linke Bereich der Abbildung bis zu einer Verkehrsdichte von circa 20 Fahrzeugen pro Kilometer ist freifließendem Verkehr zuzuordnen. Dieser entsteht dadurch, dass ca. fünf Minuten innerhalb der Simulation vergehen, bis sich qualitativ über die Mehrzahl der Streckenabschnitte eine Stausituation ausbildet. Für die nachfolgende statistische Auswertung exemplarischer Einflussparameter wird deshalb die Zeitspanne bis zu der keine stauähnliche Situation innerhalb der Verkehrssimulation vorliegt aus dem Datensatz herausgefiltert. Die aus der Simulation resultierenden Datenpunkte bei einer Dichte $\rho \geq 20$ Fz/km weisen qualitativ eine gute Übereinstimmung mit den in Abbildung 4-5 dargestellten Daten aus dem realen Straßenverkehr auf. Es existieren sowohl Bereiche mittlerer Dichte und mittlerer Flüsse, die sich dem synchronisierten Zustand zuordnen lassen als auch Bereiche hoher Dichten bei niedrigen Flüssen, welche dem Stop-and-Go Verkehr zuzuordnen sind. Dieser Eindruck wird bei Betrachtung der vorliegenden Durchschnittsgeschwindigkeiten gestärkt. Während die minimale, innerhalb des Zeitintervalls von drei Minuten, auf einem Streckensegment erfasste Geschwindigkeit $\bar{v}_{\text{Segment,min}} = 5$ km/h beträgt weist die analoge maximale Durchschnittsgeschwindigkeit einen Wert von $\bar{v}_{\text{Segment,max}} = 43$ km/h auf. Die über alle Zeitschritte und Streckensegmente ermittelte Durchschnittsgeschwindigkeit beträgt $\bar{v}_{\text{gesamt}} = 19$ km/h, womit die genannten Werte innerhalb des durch die Funktionsspezifikation definierten Wertebereichs liegen.

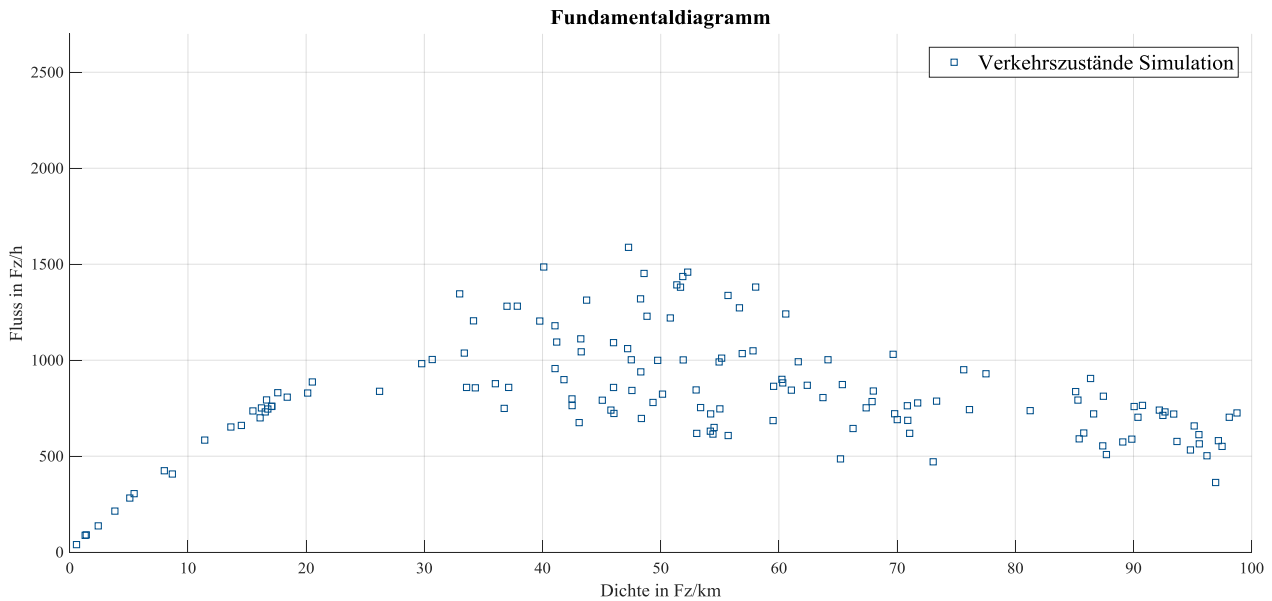


Abbildung 4-6: Aus Simulation erhaltene Verkehrszustände (Funktionales Szenario *Einscherer*)

Durch die in Kapitel 4.3.1.1 beschriebene abweichende Implementierung der Verkehrssimulation für das funktionale Szenario *Stauauflösung* ist diese zusätzlich auf plausible Verkehrszustände zu analysieren. Im Gegensatz zu weiteren in Kapitel 4.1 genannten funktionalen Szenarien wie der *Folgefahrt* oder dem *Durchscherer*, welche für die betrachtete Fahrfunktion ebenfalls in der Simulation für das funktionale Szenario *Einscherer* analysiert werden können, gestalten sich die Verhältnisse beim funktionalen Szenario *Stauauflösung* davon abweichend. In diesem Fall ist das Ziel der Simulation das Erzeugen eines Verkehrszustands, der den Übergang von zähfließendem, synchronisiertem Verkehr in den freifließenden Zustand annähert.

In Abbildung 4-7 sind die aus der Verkehrssimulation für das funktionale Szenario *Stauauflösung* erhaltenen Verkehrszustände dargestellt. Die Quadrate entstammen den Daten des Streckenabschnitts, bei welchem die Fahrbahnverengung vorliegt und eine Geschwindigkeitsbegrenzung von 60 km/h definiert ist. Der Bereich ist in Anlehnung an Abbildung 4-5 links dem synchronisierten Zustand zuzuordnen, wobei die auf diesem Streckenabschnitt vorliegende Durchschnittsgeschwindigkeit $\bar{v}_{\text{synchron}} = 49$ km/h beträgt. Die Kreise repräsentieren die Verkehrszustände auf dem Streckenabschnitt nach der Fahrbahnverengung, für den eine Geschwindigkeitsbegrenzung von 100 km/h implementiert ist. Die Verkehrszustände sind dem Freiflussbereich zuzuordnen und die vorliegende Durchschnittsgeschwindigkeit beträgt $\bar{v}_{\text{frei}} = 69$ km/h. Anzumerken ist, dass bei der Erstellung dieses Fundamentaldiagramms die Daten der letzten 30 Minuten der Simulation herangezogen werden und die Phase der Stauentstehung im Vergleich zu Abbildung 4-6 deshalb nicht erkennbar ist. Da die betrachtete Fahrfunktion ab 60 km/h ihre Funktionsgrenzen erreicht und einen entsprechenden Take-Over-Request signalisieren muss, erscheinen die für das funktionale Szenario *Stauauflösung* durch die Verkehrssimulation abgebildeten Verkehrszustände als plausibel.

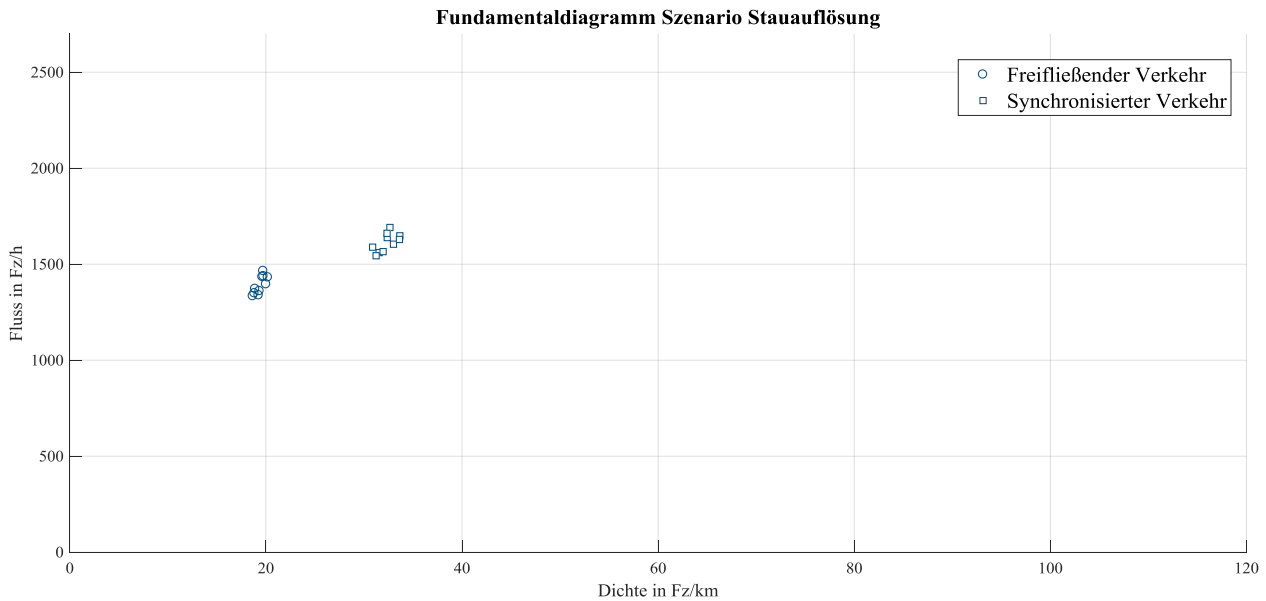


Abbildung 4-7: Aus Simulation erhaltene Verkehrszustände (Funktionales Szenario *Stauauflösung*)

Für nachfolgende Betrachtungen verschiedener Durchdringungsgrade automatisierter Fahrzeuge innerhalb der Verkehrssimulation sind keine Referenzdaten aus dem realen Straßenverkehr vorhanden, da hierdurch ein zukünftiger Verkehrszustand abgebildet wird. Deshalb wird im Rahmen dieser Arbeit die Annahme getroffen, dass die Simulation bei verschiedenen Durchdringungsgraden automatisierter Fahrfunktionen im Vergleich mit der nicht vorhandenen Referenz eine nicht signifikant abweichende Übereinstimmung im Vergleich zu den vorangegangenen Analysen ohne signifikante Durchdringung von automatisierten Fahrfunktionen erzielt.

4.3.2 Statistische Auswertung exemplarischer Einflussparameter

Innerhalb des folgenden Teilkapitels wird die Anwendbarkeit der Methode statistischer Auswertungen im vorhandenen Simulationsframework demonstriert. Hierzu werden die ermittelten Wertebereiche und Auftretenswahrscheinlichkeiten für exemplarische, in Kapitel 4.2 ausgewählte, Einflussparameter der Ebenen der stationären Elemente sowie der beweglichen Objekte aufgezeigt. Die Datendeskription erfolgt unter Nutzung der im Grundlagenteil eingeführten Lage- und Streuungsmaße sowie in grafischer Darstellung durch Histogramme. Anschließend wird der Einfluss des Durchdringungsgrads automatisierter Fahrzeuge auf die Wertebereiche und Auftretenswahrscheinlichkeiten ausgewählter Einflussparameter aufgezeigt.

4.3.2.1 Ermittlung von Wertebereichen und Auftretenswahrscheinlichkeiten

Der Schwerpunkt dieses Kapitels liegt auf der Demonstration der Anwendbarkeit statistischer Auswertungen im gegebenen Simulationsframework. Dabei besteht der Neuheitsgrad darin, die Wertebereiche und Auftretenswahrscheinlichkeiten sämtlicher Einflussparameter der beweglichen Objekte ausschließlich durch das vorliegende Simulationsframework zu ermitteln und damit eine systematische Ableitung logischer Szenarien zu ermöglichen. Mit dem Ziel die Gesamtheit einer Szenarienbeschreibung zu ermöglichen, werden zusätzlich die, durch die vorliegende OpenDRIVE-Datei des

Straßennetzwerks zugänglichen, Einflussparameter der stationären Elemente ausgewertet. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt liegt keine signifikante Durchdringung höher automatisierter Fahrfunktionen im Straßenverkehr vor.²⁴⁶ Aus diesem Grund sind für die betrachtete Fahrfunktion des TJC bei einer Markteinführung in naher Zukunft die Wertebereiche und Auftretswahrscheinlichkeiten der Einflussparameter im aktuellen Straßenverkehr relevant. Anzumerken ist, dass sich der Fokus der statistischen Auswertungen stets auf die Ermittlung von Wertebereichen und Auftretswahrscheinlichkeiten der ausgewählten Einflussparameter richtet. Es wird die Annahme getroffen, dass durch die erfolgte Plausibilisierung der Verkehrssimulation anhand makroskopischer Verkehrsmetriken in 4.3.1.2 plausible Wertebereiche und Auftretswahrscheinlichkeiten auf mikroskopischer Ebene, welche die Bewegungen einzelner Fahrzeuge erfasst, resultieren. Eine Validierung der ermittelten Wertebereiche und Auftretswahrscheinlichkeiten hat gesondert, beispielsweise durch den Abgleich mit Realdaten, zu erfolgen.

In Abbildung 4-8 ist exemplarisch für die Einflussparameter der stationären Elemente die statistische Auswertung der Breite des rechten Fahrstreifens in Fahrtrichtung B (siehe Abbildung 4-4) aufgezeigt. Neben der Darstellung des Histogramms sind die Lage- sowie Streuungsmaße in Form von Median x_{med} , Standardabweichung s , zentralem Quartilsabstand Q und Variationskoeffizient V des zu Grunde liegenden Datensatzes erkenntlich. Außerdem ist der Stichprobenumfang N angegeben. Da in Bezug auf die Einflussparameter der stationären Elemente durch Normen und Richtlinien ein zusätzlicher Vergleichsmaßstab für die entsprechenden Wertebereiche gegeben ist, können diese ebenfalls zur Plausibilisierung der Verteilungen dienen. Der Vergleich der vorliegenden Verteilung mit dem in Kapitel 4.2.1 angeführten, normativ vorgegebenen Wert der Fahrstreifenbreite von 3.75 m für den rechten Fahrstreifen lässt auf grundsätzlich hohe Plausibilität schließen. Dies bestätigt sich durch die statistische Auswertung der weiteren Einflussparameter in Form der Breite des linken Fahrstreifens, der Breite des mittleren Fahrstreifens, des Fahrstreifenmarkierungstyps der rechten Seite des rechten Fahrstreifens, der Fahrstreifenmarkierungsbreite der rechten Seite des rechten Fahrstreifens, der Markierungselementlücke der rechten Seite des rechten Fahrstreifens sowie der Längs- und Querneigung der Fahrbahn. Sämtliche Einflussparameter der stationären Elemente werden innerhalb des in der Verkehrssimulation relevanten Streckenabschnitts auf einer Länge von 1980 m ausgewertet. Beim Parameter der Längsneigung wurde der Datensatz auf den normativ vorgegebenen Wertebereich der Steigung von $G_{\text{max}} = \pm 6 \%$ gefiltert. Der Stichprobenumfang von $N = 2$ ergibt sich bei den diskreten Parametern aufgrund der Tatsache, dass die Werte dieser Parameter innerhalb der OpenDrive-Datei längenbasiert aufgezeichnet werden. Für den Fall des Fahrstreifenmarkierungstyps ergeben sich beispielsweise die bedingten Wahrscheinlichkeiten $P_{\text{Durchgezogen}} = 0.848$ und $P_{\text{Unterbrochen}} = 0.152$ durch den Eintrag „Durchgezogen“ auf einer Länge von 1681 m und den Eintrag „Unterbrochen“ auf einer Länge von 299 m. Für die Darstellungen der statistischen Auswertungen der restlichen zuvor genannten Einflussparameter der stationären Elemente sei auf Kapitel A.1 des Anhangs verwiesen.

²⁴⁶ Altenburg, S. et al.: Einführung von Automatisierungsfunktionen in Pkw-Flotte (2018), S. 5 ff.

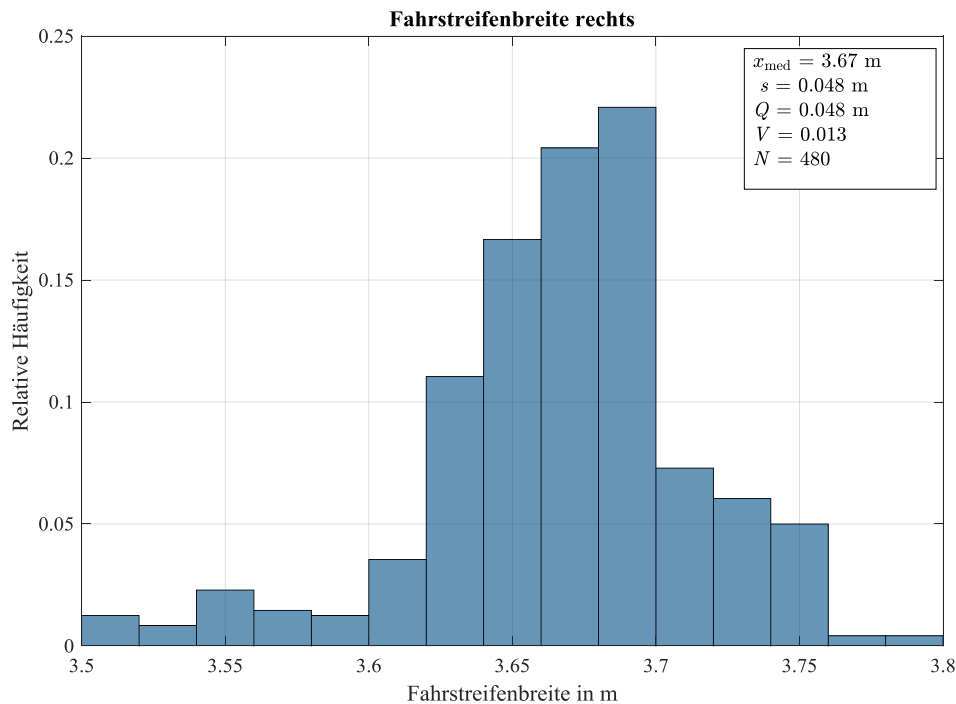


Abbildung 4-8: Statistische Auswertung der Fahrstreifenbreite rechts

Innerhalb der Ebene der beweglichen Objekte werden sämtliche Einflussparameter ausgewertet, welche in Kapitel 4.2.2 für die funktionalen Szenarien *Einscherer* und *Stauauflösung* ausgewählt wurden. Nachfolgend werden exemplarisch die statistischen Auswertungen der Parameter des Einscherabstands und der Einscherdauer als Repräsentanten des funktionalen Szenarios *Einscherer* beschrieben. Zudem erfolgt eine Erläuterung der statistischen Auswertung der Initialdistanz zwischen Ego-Fahrzeug und Führungsfahrzeug während des funktionalen Szenarios *Stauauflösung*.

In Abbildung 4-9 ist die statistische Auswertung des Einscherabstands innerhalb des funktionalen Szenarios *Einscherer* aufgezeigt. Dabei ist der Einscherabstand als longitudinaler Abstand zwischen Heckstoßstange des einscherenden Fahrzeugs und Frontstoßstange des Folgefahrzeugs auf dem Zielfahrstreifen definiert. Die Auswertung erfolgt jeweils zu dem Zeitpunkt, in welchem die Fahrzeuglängsachse des einscherenden Fahrzeugs die gemeinsame Fahrstreifenmarkierung zwischen Ausgangs- und Zielfahrstreifen schneidet. Bei der Datenfilterung wird die Annahme getroffen, dass Einscherabstände > 50 m nicht relevant für das funktionale Szenario sind.²⁴⁷

²⁴⁷ Aouini, R.: Masterthesis, Reduktionspotential funktionale Dekomposition (2018), S. 32–34.

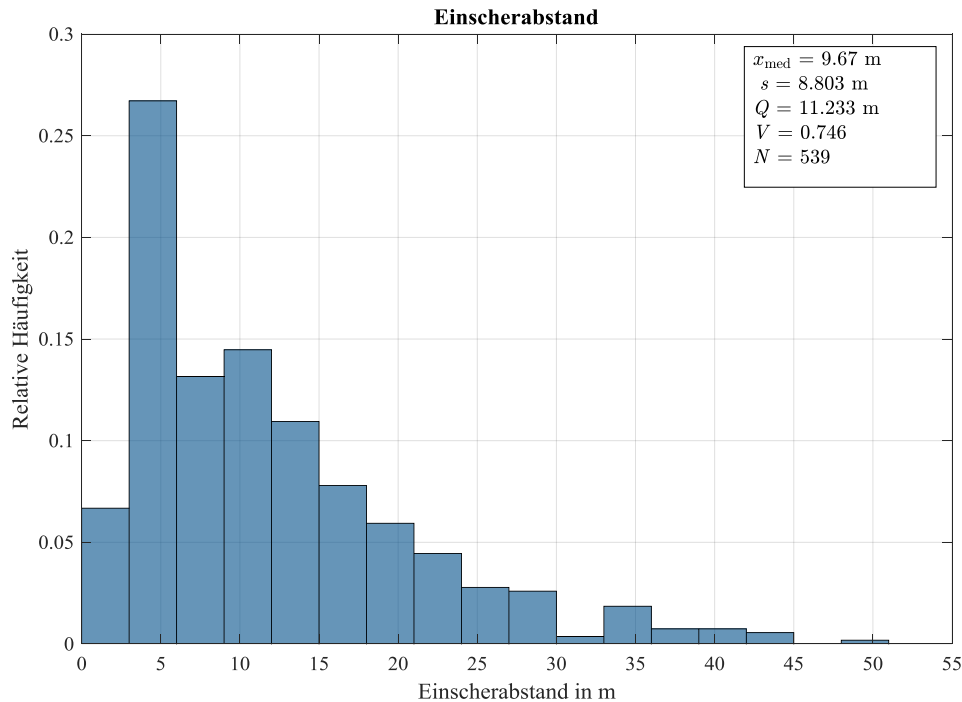


Abbildung 4-9: Statistische Auswertung Einscherabstand (Funktionales Szenario *Einscherer*)

Die statistische Auswertung der Einscherdauer ist in Abbildung 4-10 dargestellt. Innerhalb SUMO wird bei der Initialisierung eines Fahrstreifenwechsels durch ein Fahrzeug eine Manöverdistanz definiert, welche den lateralen Abstand beschreibt, den das entsprechende Fahrzeug für einen vollständigen Fahrstreifenwechsel zurückzulegen hat. Die Einscherdauer ist durch die benötigte Zeitspanne zum Überwinden dieser Manöverdistanz festgelegt.

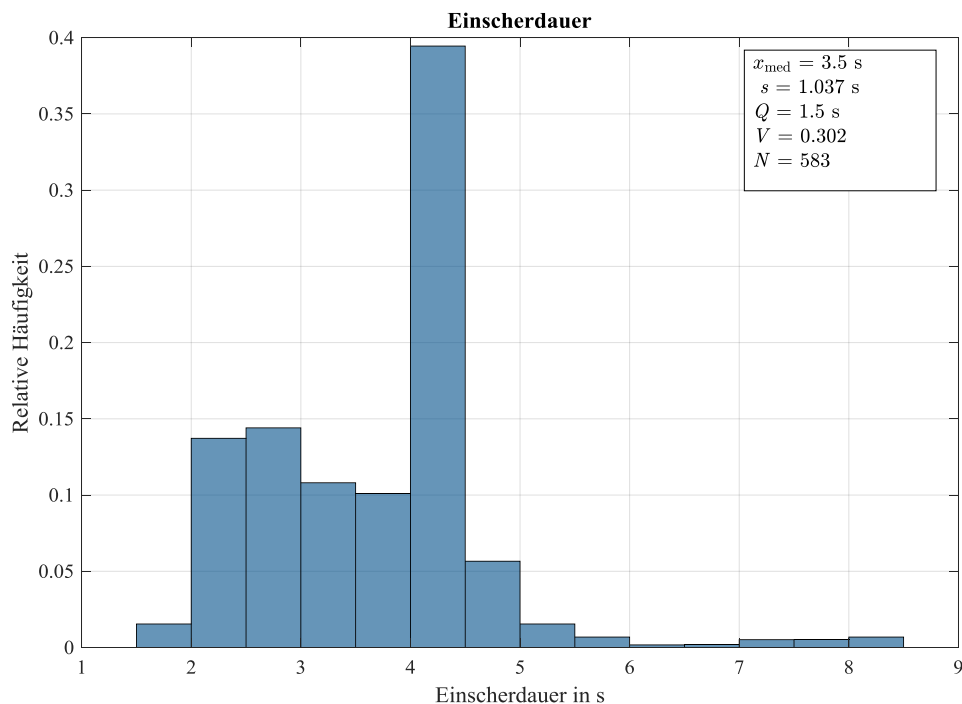


Abbildung 4-10: Statistische Auswertung Einscherdauer (Funktionales Szenario *Einscherer*)

Stellvertretend für die Einflussparameter der beweglichen Objekte innerhalb des funktionalen Szenarios *Stauauflösung* ist in Abbildung 4-11 die statistische Auswertung der Initialdistanz zwischen Ego-Fahrzeug und Führungsfahrzeug aufgezeigt. Diese Distanz ist durch den longitudinalen Abstand zwischen Frontstoßstange des Ego-Fahrzeugs und Heckstoßstange des Führungsfahrzeugs nach Überschreiten des Streckenabschnitts mit synchronisiertem Verkehrszustand durch das Ego-Fahrzeug definiert.

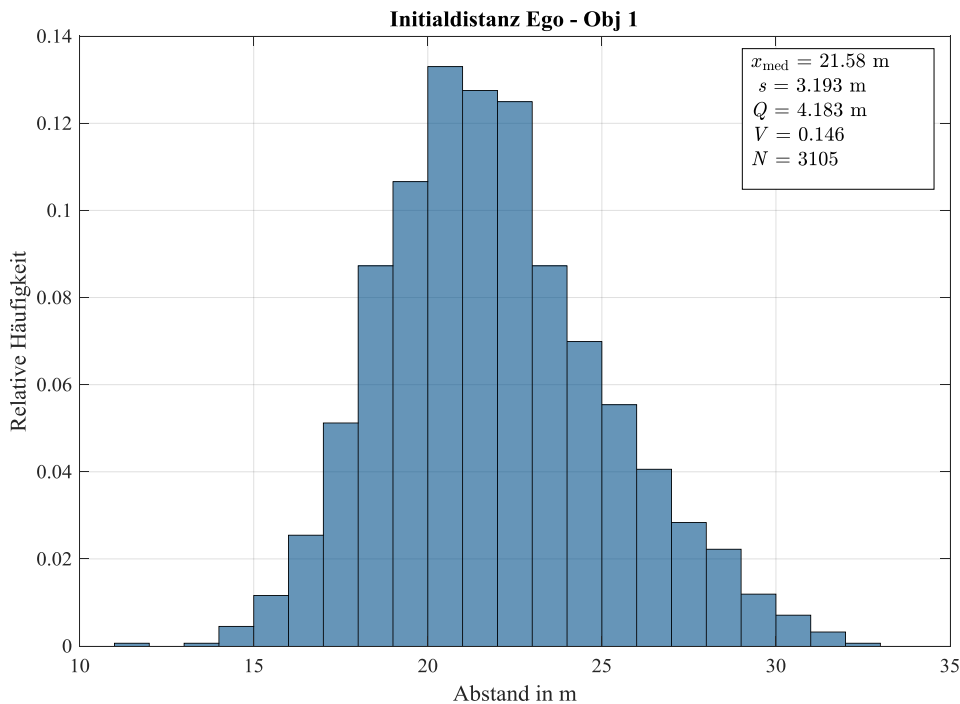


Abbildung 4-11: Statistische Auswertung Initialdistanz Ego-Obj 1 (Funktionales Szenario *Stauauflösung*)

Bereits anhand dieser exemplarischen Auswahl an ausgewerteten Einflussparametern wird deutlich, dass sich die Verteilungen verschiedener Parameter sichtbar unterscheiden. Eine Voraussage der Wertebereiche und Auftretenswahrscheinlichkeiten der ausgewählten Einflussparameter durch Expertenwissen erscheint äußerst herausfordernd. Dieser Eindruck verstärkt sich mit Blick auf die restlichen ermittelten Verteilungen der ausgewählten Einflussparameter. Die statistischen Auswertungen der verbleibenden neun in Kapitel 4.2 ausgewählten Einflussparameter der beweglichen Objekte sind dem Kapitel A.2 des Anhangs zu entnehmen. Die vorherigen Ausführungen zeigen auf, dass durch statistische Auswertungen eine systematische Ableitung logischer Szenarien im vorhandenen Simulationsframework für die Einflussparameter der stationären Elemente und der beweglichen Objekte möglich ist. Dabei sei auf die Notwendigkeit hingewiesen, die ermittelten Wertebereiche und Auftretenswahrscheinlichkeiten jeweils vor dem Hintergrund der im Rahmen dieser Arbeit beschränkten Repräsentativität zu interpretieren. Diese hängt sowohl vom vorliegenden Straßennetzwerk als auch von der Validität der in der Simulation implementierten Modelle ab. Die Anwendbarkeit der Methodik ist bei Erhöhung der Repräsentativität weiterhin gegeben. Die ermittelten Wertebereiche und Auftretenswahrscheinlichkeiten der ausgewählten Einflussparameter bilden die Basis für die Generierung von Diskretisierungsfunktionen dieser Einflussparameter innerhalb des Prozessschritts der Definition konkreter Szenarien.

4.3.2.2 Einfluss des Durchdringungsgrads automatisierter Fahrzeuge

Nachfolgend ist die Untersuchung des Einflusses des Durchdringungsgrads automatisierter Fahrzeuge auf die Wertebereiche und Auftretenswahrscheinlichkeiten der exemplarischen Einflussparameter des Einscherabstands sowie der Initialgeschwindigkeit des einscherenden Fahrzeugs aufgezeigt. Motivation dieser Untersuchung ist die Tatsache, dass in Zukunft mit einer sich kontinuierlich steigenden Durchdringung automatisierter Fahrzeuge zu rechnen ist.²⁴⁸ Da das Fahrverhalten einer automatisierten Fahrfunktion möglicherweise von dem Fahrverhalten eines menschlichen Fahrzeugführenden abweicht ist mit einer Veränderung der Wertebereiche und Auftretenswahrscheinlichkeiten der Einflussparameter eines relevanten Szenarios zu rechnen.²⁴⁹ Die nachfolgenden Ausführungen sind als Ausgangspunkt für tiefergehende Untersuchungen anzusehen, erheben keinen Anspruch auf Repräsentativität und sollen die grundsätzliche Möglichkeit aufzeigen, dieser Fragestellung durch simulationsbasierte Anwendungen zu begegnen.

In der vorliegenden Verkehrssimulation werden automatisierte Fahrzeuge durch Implementierung des ACC-Modells^{250a} als *Car-following model* sowie eine abgeänderte Parametrierung des *Lane-changing models* modelliert. Die Parametrierung des *Lane-changing Models* folgt dabei den Vorgaben von Mintsis^{250b}, welcher die höchste Übereinstimmung zwischen dem Modell und OEM²⁵¹-Vorgaben bezüglich des Einscherabstands bei einem Wert von *lcAssertive* = 0.7 beobachtet. Der Prozentsatz der Durchdringung wird auf Basis der Analysen der Prognos AG gewählt, welche eine Studie zur Durchdringung von Automatisierungsfunktionen innerhalb der Pkw-Flotte bis zum Jahr 2050 veröffentlicht hat.²⁴⁸ Über die auf Basis der Studie abgeleiteten Durchdringungen hinaus wird zusätzlich der Einfluss eines fiktiven Durchdringungsgrads von 75 % untersucht, um etwaige Trends bezüglich der Änderungen von Wertebereich und Auftretenswahrscheinlichkeit des betrachteten Parameters zu bestätigen oder zu widerlegen. Die Implementierung in SUMO erfolgt durch Definition eines zusätzlichen Verkehrsaufkommens an automatisierten Pkw, wobei das ursprüngliche Verkehrsaufkommen der Pkw reduziert wird. Somit wird insgesamt die gleiche Anzahl an Fahrzeugen wie bei der Referenzsimulation ohne automatisierte Fahrzeuge eingesetzt.

In Abbildung 4-12 ist der Einfluss verschiedener Durchdringungsgrade automatisierter Fahrfunktionen auf den Einscherabstand in Form eines Box-Whisker-Plots dargestellt. Dieser Parameter wird ausgewählt, da er in mehreren Veröffentlichungen als relevanter Einflussparameter des funktionalen Szenarios *Einscherer* deklariert wird.^{252,253} Wie im vorherigen Abschnitt wird der Datensatz auf Einscherabstände < 50 m gefiltert. Zudem ist die Skala der Ordinate auf 35 m begrenzt, was zur Verdeutlichung der Verhältnisse beiträgt, allerdings dazu führt, dass einige der als Kreuze dargestellten

²⁴⁸ Altenburg, S. et al.: Einführung von Automatisierungsfunktionen in Pkw-Flotte (2018).

²⁴⁹ Amersbach, C.; Winner, H.: Funktionale Dekomposition (2018), S. 4.

²⁵⁰ Mintsis, E.: Modelling automated vehicles behaviour in mixed traffic (2018). a: S. 9 ff.; b: S. 26.

²⁵¹ Original Equipment Manufacturer

²⁵² Amersbach, C.; Winner, H.: Functional decomposition (2019).

²⁵³ Z. Huang et al.: Evaluation of automated vehicles (2017), S. 198.

Ausreißer außerhalb des Darstellungsbereichs liegen. Bei einer Durchdringung automatisierter Fahrfunktionen von 1 % ergibt sich eine Verringerung des Medians der Verteilung um 42 % im Vergleich zur Simulation ohne Durchdringung. Zusätzlich verringert sich der zentrale Quartilsabstand um 32 %, was auf eine konzentriertere Verteilung schließen lässt. Bei weiterer Erhöhung der Durchdringung steigt der Median kontinuierlich an und übersteigt bei 75 % Durchdringung den Wert bei 1 % Durchdringung um 22 %. Der zentrale Quartilsabstand ändert sich dabei um weniger als 1 %. Insgesamt ist ab einer vorhandenen Durchdringung ein Sprung der Einscherabstände in Richtung kleinerer Werte zu beobachten, welche weniger streuen als für den Fall ohne Durchdringung automatisierter Fahrzeuge. Dabei steigt der Median der entsprechenden Verteilung ab 5 % Durchdringung kontinuierlich an, erreicht jedoch nicht das Ausgangsniveau ohne Durchdringung.

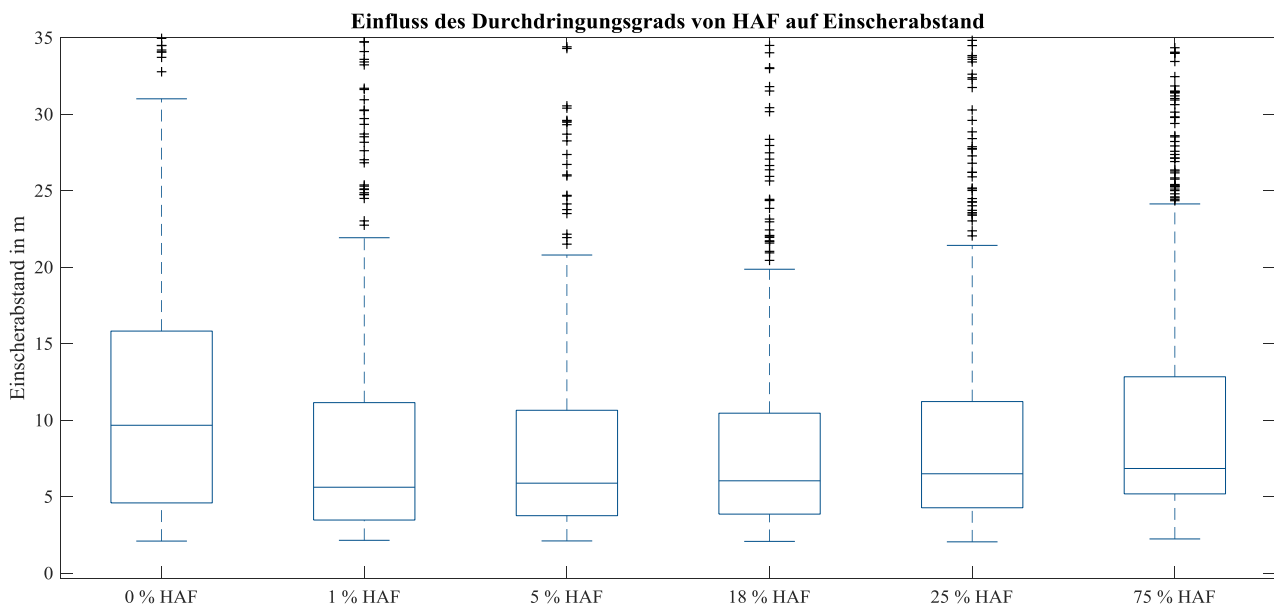


Abbildung 4-12: Einfluss des Durchdringungsgrads von HAF auf den Einscherabstand

Hinsichtlich der absoluten Anzahl an Fahrstreifenwechsel lässt sich ein ähnlicher Verlauf beobachten. Die Anzahl an Fahrstreifenwechsel sinkt bis zu einer Durchdringung von 5 % und steigt anschließend kontinuierlich an. Dabei übersteigt die Anzahl an Fahrstreifenwechsel bei 75 % Durchdringung das Ausgangsniveau ohne Durchdringung um 81 %, wie aus Abbildung 4-13 ersichtlich.

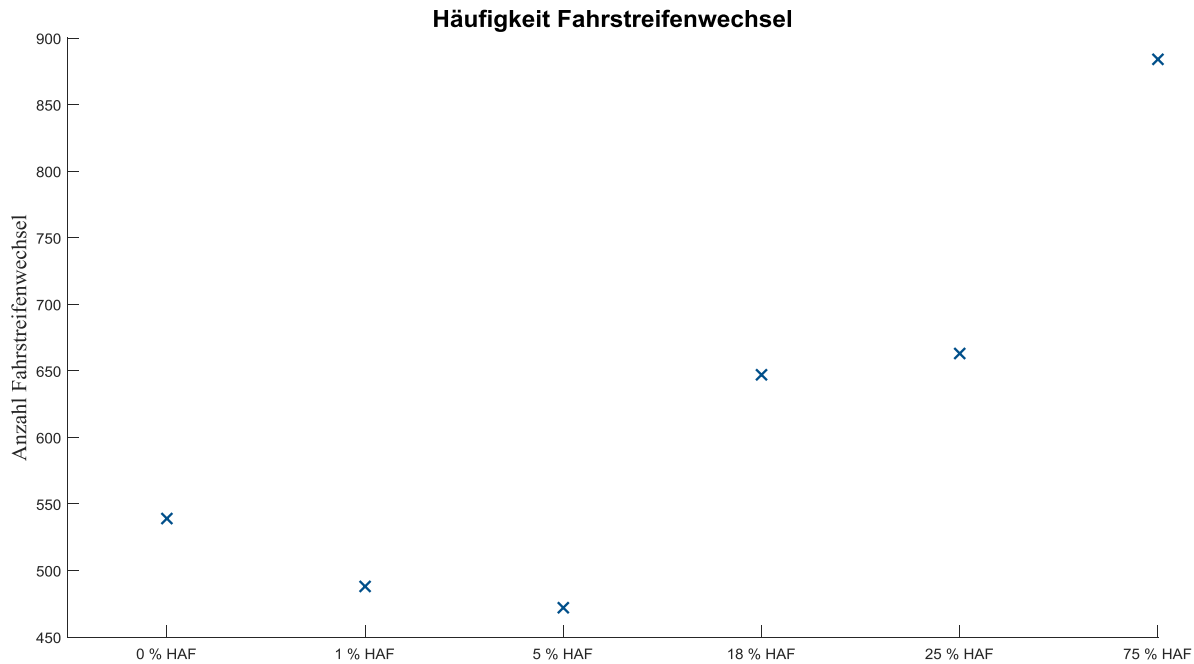


Abbildung 4-13: Anzahl erfolgreicher Fahrstreifenwechsel in Abhängigkeit des Durchdringungsgrads

In Abbildung 4-14 ist der Einfluss verschiedener Durchdringungsgrade automatisierter Fahrzeuge auf die Initialgeschwindigkeit des einscherenden Fahrzeugs aufgezeigt. Wie in Abbildung 4-12 ist ein Sprung des Medians beim Übergang vom Zustand ohne Durchdringung auf den Zustand mit 1 % Durchdringung zu beobachten. Der Median fällt dabei von $x_{\text{med},0\%} = 14.5 \text{ km/h}$ auf $x_{\text{med},1\%} = 5.3 \text{ km/h}$ und fällt im weiteren Verlauf kontinuierlich ab. Der zentrale Quartilsabstand verringert sich ebenfalls von $Q_{0\%} = 31.6 \text{ km/h}$ auf $Q_{1\%} = 21 \text{ km/h}$. Im Gegensatz zu den Verhältnissen beim Einscherabstand verringert sich der zentrale Quartilsabstand ebenfalls kontinuierlich bis zu einem Wert von $Q_{75\%} = 6.7 \text{ km/h}$, was auf eine konzentrierte Verteilung schließen lässt.

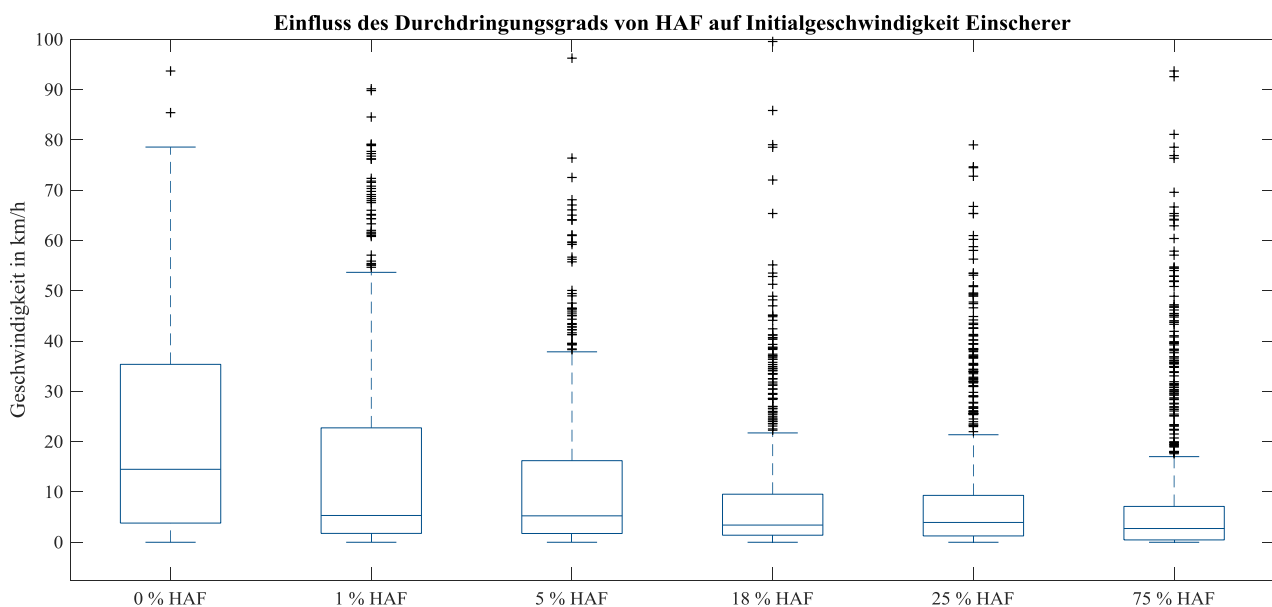


Abbildung 4-14: Einfluss Durchdringungsgrad von HAF auf Initialgeschwindigkeit Einscherer

Die vorangegangenen Betrachtungen zeigen, dass sich sowohl die Lage- als auch die Streuungsmaße der Verteilungen der exemplarisch betrachteten Einflussparameter bei Erhöhung des Durchdringungsgrads automatisierter Fahrzeuge innerhalb der Verkehrssimulation ändern. Um die Ursachen dieser Veränderungen systematisch aufzudecken sind tiefergehende Untersuchungen notwendig. Da keine weiteren veröffentlichten Untersuchungen dieser Art zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit bekannt sind besteht kein Vergleichsmaßstab zur Plausibilisierung der Verteilungen. Es bleibt offen, ob die getroffene Modellierung innerhalb der Simulation als valide anzusehen ist und das tatsächliche Verhalten automatisierter Fahrzeuge hinreichend genau abbildet. Aus diesem Grund bleibt die Frage nach der Validität der resultierenden Datensätze ebenfalls offen. Wertende Interpretationen werden im fünften Kapitel dieser Arbeit diskutiert. Verbesserungsvorschläge zur Erhöhung der Validität der resultierenden Verteilungen, welche auf Erkenntnissen der vorliegenden Implementierung beruhen, werden im Ausblick gegeben.

4.4 Definition konkreter Szenarien

Im nachfolgenden Kapitel wird die Definition konkreter Szenarien im vorhandenen Simulationsframework demonstriert. Basis dieses letzten Prozessschritts innerhalb der entwickelten Gesamtmethodik ist die Analyse der potenziellen Einflussparameter durch statistische Auswertungen, wie im vorherigen Kapitel aufgezeigt. Die ausgewerteten Datensätze der verschiedenen Einflussparameter bilden die Grundlage für die Generierung von Diskretisierungsfunktionen, die nachfolgend anhand eines exemplarischen wertkontinuierlichen Einflussparameters aufgezeigt wird. Zudem wird erläutert wie die statistische Auswertung der diskreten Einflussparameter zur Definition konkreter Szenarien genutzt wird. Anschließend wird die Methode der funktionalen Dekomposition auf die betrachteten funktionalen Szenarien angewandt und die damit einhergehende Reduktion des Parameterraums quantifiziert. Abschließend erfolgt eine Beschreibung einer möglichen, deterministischen Parametervariation. Die definierten konkreten Szenarien sind schließlich zur Identifikation kritischer Szenarien im gekoppelten Simulationsframework verwendbar.

4.4.1 Generierung von Diskretisierungsfunktionen

In diesem Teilkapitel wird der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Ansatz zur Überführung der wertkontinuierlichen Einflussparameter in diskrete Parameterwerte vorgestellt. Außerdem wird aufgezeigt wie die statistische Auswertung der diskreten Einflussparameter weiterverarbeitet wird, um mit der Gesamtheit der vorliegenden Einflussparameter konkrete Szenarien zu definieren. Der Ansatz wird exemplarisch anhand der Auswertung des Einscherabstands als Vertreter der wertkontinuierlichen Parameter vorgestellt. Es sei darauf hingewiesen, dass der Ansatz auf sämtliche innerhalb des Simulationsframeworks auswertbare Einflussparameter anwendbar ist.

In Abbildung 4-15 ist die Kerndichteschätzung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des Einscherabstands dargestellt. Das abgebildete Histogramm entspricht der Darstellung aus Kapitel 4.3.2, wobei die Normierung in der Art gewählt ist, dass die Höhe eines Balkens nicht die bedingte Wahrscheinlichkeit, sondern die geschätzte Wahrscheinlichkeitsdichte angibt. Aus diesem Grund entspricht nicht die Summe der Balkenhöhen, sondern die der Balkenflächen dem Wert eins. Die Dichteschätzung wird mit dem Epanechnikov-Kern bei einer Bandbreite von $h = 0.32$ m durchgeführt.

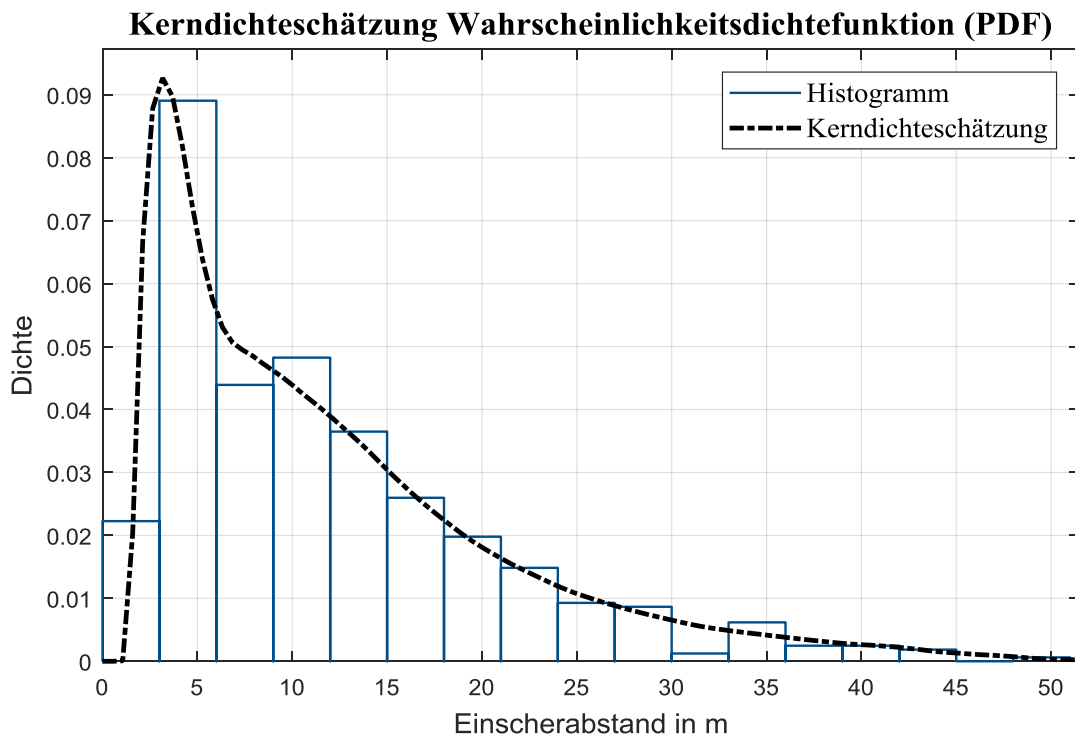


Abbildung 4-15: Kerndichteschätzung Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des Einscherabstands

Zur Überführung des kontinuierlichen Wertebereichs in einen diskreten Wertebereich wird die Quantilfunktion herangezogen, welche den Funktionswert einer Zufallsvariable in Abhängigkeit von deren kumulativer Wahrscheinlichkeit P_{kum} angibt.²⁵⁴ Da die durch die Kerndichteschätzung erzeugten Datenpunkte in MATLAB zunächst als Wertetabelle vorliegen, wird die der Wertetabelle zu Grunde liegende Funktion in einem Zwischenschritt durch ein Fourierpolynom fünften Grades $\mathcal{F}_5(P_{\text{kum}})$ angenähert. Das Vorliegen einer stetigen Quantilfunktion ist Voraussetzung für eine von der Gesamtanzahl an Diskretisierungsstufen beziehungsweise Instanzen v_i unabhängige Definierbarkeit der entsprechenden Diskretisierungsfunktion. Dieser Umstand wird in den nachfolgenden Ausführungen tiefergehend erläutert.

In Abbildung 4-16 ist der Datensatz der Kerndichteschätzung vom Umfang $N = 1020$ durch Kreuze dargestellt. Das Fourierpolynom ist durch die durchgezogene Linie dargestellt. Da das Ziel des Fourierpolynoms die Annäherung des Datensatzes ist überdeckt die Linie in der Darstellung die Kreuze des Datensatzes über den Großteil des Wertebereichs, sodass diese zum Teil nicht sichtbar sind. Das adjustierte Bestimmtheitsmaß der Näherung ist durch $\bar{R}^2 = 0.99$ gegeben.

²⁵⁴ Cramer, E.; Kramps, U.: Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik (2017), S. 208–214.

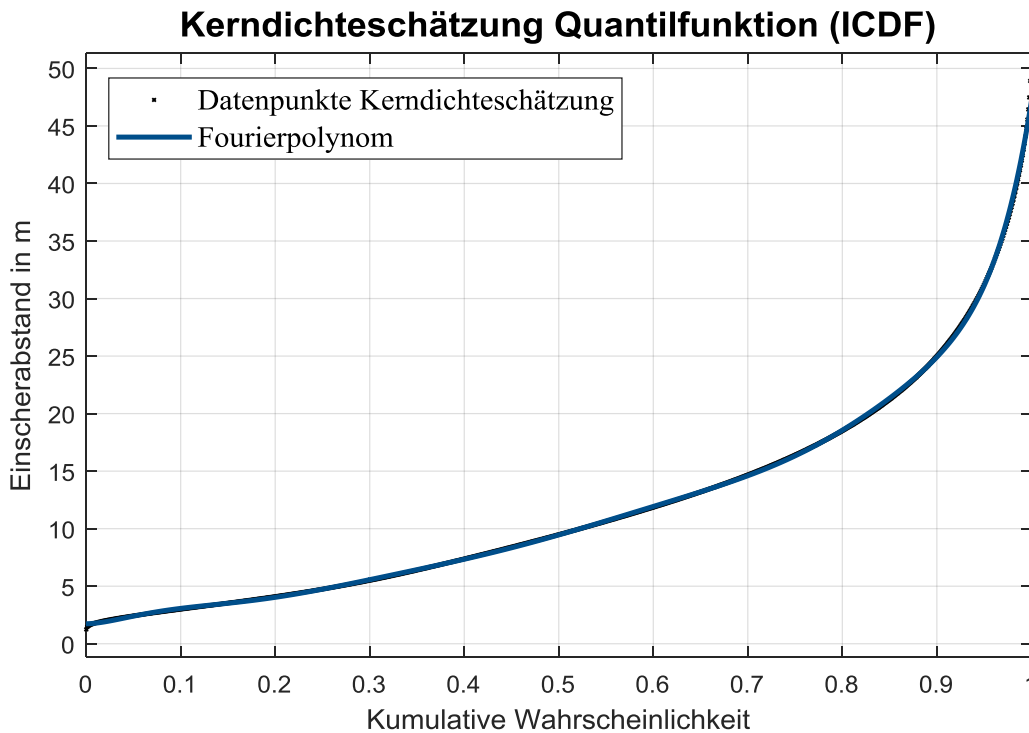


Abbildung 4-16: Kerndichteschätzung der Quantilfunktion mit zugehörigem Fourierpolynom

Der Ansatz der Diskretisierung basiert auf dem Fourierpolynom, welches eine stetige Schätzung der Quantilfunktion des entsprechenden Parameters – in diesem Fall des Einscherabstands – darstellt. Auf Basis dieses Polynoms lässt sich der Wertebereich des betrachteten Einflussparameters bei Vorgabe einer Anzahl an Instanzen v_i in sogenannte wahrscheinlichkeitsbasierte Äquivalenzklassen einteilen. Die daraus resultierende variable Diskretisierung im absoluten Wertebereich des entsprechenden Einflussparameters ist in Abbildung 4-17 für $v_i = 10$ aufgezeigt. Dabei repräsentieren die punktierten Linien die Aufteilung der kumulativen Wahrscheinlichkeit in äquidistante Klassen, deren jeweilige kumulative Wahrscheinlichkeit sich nach Formel (4-2) berechnet.

$$P_{\text{kum}} = \frac{1}{v_i} \quad (4-2)$$

Für den Fall des Einscherabstands ergibt sich $P_{\text{kum}} = 0.1$ als Klassenbreite der kumulativen Wahrscheinlichkeit. Der Funktionswert des Fourierpolynoms an den Klassengrenzen der kumulativen Wahrscheinlichkeit definiert die Klassengrenzen des absoluten Wertebereichs des betrachteten Parameters. In Tabelle 4-8 sind die resultierenden Klassenbreiten $\delta_{\text{EA},i}$ der i -ten Klasse für die Diskretisierung des Einscherabstands, welche sich nach Formel (4-3) berechnen, aufgezeigt.

$$\delta_{EA,i} = \mathcal{F}_5(P_{\text{kum}}(i)) - \mathcal{F}_5(P_{\text{kum}}(i-1)) \quad (4-3)$$

Es wird deutlich, dass durch das Vorliegen des stetigen Fourierpolynoms als Annäherung der Kern-dichteschätzung der Quantilfunktion eine beliebige Vorgabe der Instanzenanzahl v_i und damit eine beliebig feine Diskretisierung möglich ist. Die auf diese Weise definierten wahrscheinlichkeitsbasierten Äquivalenzklassen legen den Wertebereich fest, innerhalb dessen die deterministische Parametervariation jeweils einen Parameterwert für die konkreten Szenarien innerhalb der Testsuite bestimmt.

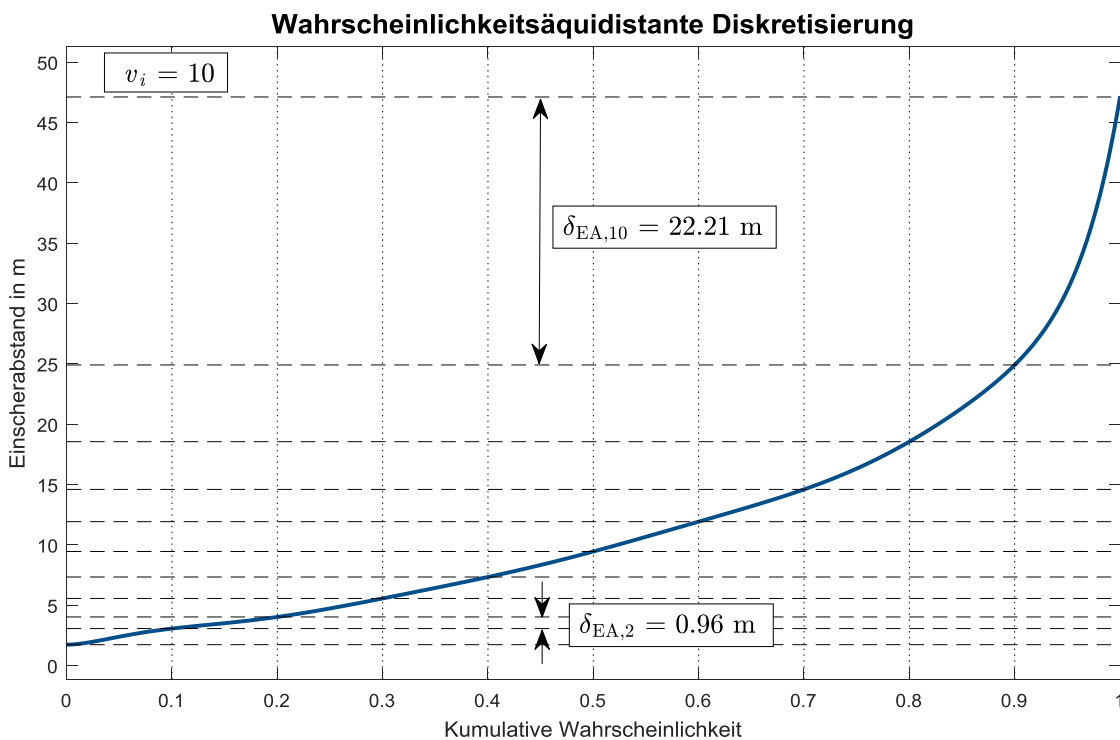


Abbildung 4-17: Wahrscheinlichkeitsäquidistante Diskretisierung des Einscherabstands

Für den Fall diskreter Einflussparameter besteht die Möglichkeit der Verwendung der in der statistischen Auswertung ermittelten bedingten Wahrscheinlichkeiten jeder Merkmalsausprägung für die Definition konkreter Szenarien. Bei Erstellung einer Testsuite, welche mehrere konkrete Szenarien enthält, werden die Merkmalsausprägungen im Verhältnis ihrer bedingten Wahrscheinlichkeiten auf die zur Verfügung stehende Anzahl konkreter Szenarien aufgeteilt.

Tabelle 4-8: Klassenbreiten der Diskretisierung des Einscherabstands

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P_{kum}	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
$\mathcal{F}_5(P_{\text{kum}})$ in m	1.73	3.07	4.03	5.57	7.34	9.46	11.93	14.6	18.56	24.91	47.12
$\delta_{EA,i}$ in m		1.34	0.96	1.54	1.77	2.12	2.47	2.67	3.96	6.35	22.21

4.4.2 Funktionale Dekomposition

Die in Kapitel 3.2.4.4 beschriebene Methode der funktionalen Dekomposition wird im Rahmen dieser Arbeit auf die betrachteten funktionalen Szenarien angewandt. Durch die erläuterten Effekte des partikulären Testens kann mit Hilfe der Dekomposition eine Reduktion des Parameterraums im Vergleich zum Test des Gesamtsystems erreicht werden.

In Tabelle A-1 des Anhangs ist die Übersichtsmatrix der funktionalen Dekomposition für die exemplarisch betrachteten funktionalen Szenarien *Einscherer* und *Stauauflösung* mit dem jeweils korrespondierenden Parameterraum dargestellt. Die Art Darstellung wird von Amersbach und Winner^{255a} übernommen und auf die vorliegende Aufgabenstellung angewandt. Ebenso wird ein Großteil der definierten Instanzenzahlen v_i der ausgewählten Einflussparameter übernommen.

Abweichende Definitionen werden zum einen beim Fahrstreifenmarkierungstyp getroffen, für den im Rahmen dieser Arbeit, auf Grund der in den Richtlinien für die Markierung von Straßen²⁵⁶ definierten zehn Grundformen der Markierungszeichen, die Instanzenanzahl $v_i = 10$ gewählt wird. Zum anderen wird der durch Amersbach und Winner definierte Parameter *Slope* in die in Kapitel 4.3.2 statistisch ausgewerteten Parameter Längs- und Querneigung unterteilt, welchen jeweils eine Instanzenanzahl von $v_i = 10$ zugeordnet wird. Weiterhin wird die Instanzenanzahl der verschiedenen ausgewählten Einflussparameter der Fahrzeugtypen zu $v_i = 3$ definiert. Dies lässt sich dadurch begründen, dass zum aktuellen Zeitpunkt im Simulationsframework in die drei verschiedenen Fahrzeugtypen Pkw, Lkw und Kraftrad unterschieden wird, deren Eigenschaften wie Fahrzeughöhe und -breite jedoch einen Wertebereich umfassen, innerhalb dessen beispielsweise auch Transporter oder Reisemobile anzusiedeln sind.²⁵⁷ Für den innerhalb der Ebene der beweglichen Objekte des funktionalen Szenarios *Stauauflösung* zusätzlich definierten Einflussparameter der Beschleunigung des Ego- und Führungsfahrzeugs wird ebenfalls eine Instanzenanzahl von $v_i = 10$ definiert.

Es sei darauf hingewiesen, dass die Wahl der Instanzenanzahlen auf den Ausführungen von Amersbach und Winner und damit auf Expertenwissen beruht. Wie in deren Veröffentlichung erläutert, würde eine andere Auswahl von Einflussparametern und Diskretisierungsstufen zwar die absoluten Verhältnisse der Parameterraumreduktion ändern, hätte jedoch keinen signifikanten Einfluss auf den relativen Vergleich zwischen partikulärem Testen und Systemtest.^{255b}

In Abbildung 4-18 ist das Potenzial der Reduktion des Parameterraums durch die Anwendung der Methode der funktionalen Dekomposition auf die exemplarisch betrachteten funktionalen Szenarien dargestellt. Die Darstellung erfolgt durch den Quotient aus Systemtest und partikulärem Testen über verschiedenen Testabdeckungen. Die mit der Methode einhergehenden Reduktionseffekte führen bei Anwendung auf die exemplarisch betrachteten funktionalen Szenarien zu einem Reduktionsfaktor

²⁵⁵ Amersbach, C.; Winner, H.: Functional decomposition (2019). a: Appendix; b: S. 55-56.

²⁵⁶ FGSV: Richtlinien für die Markierung von Straßen (1993), S. 6.

²⁵⁷ Vgl. Kapitel 4.3.1.1 (Implementierung und Parametrierung).

von 45 bei 3-weiser Testabdeckung, welcher aus $S_{3,\text{System}} = 1.5 \cdot 10^6$ und $S_{3,\text{part}} = 3.3 \cdot 10^4$ resultiert. Der zu einer 10-weisen Testabdeckung korrespondierende Reduktionsfaktor von 30 ergibt sich durch $S_{3,\text{System}} = 9 \cdot 10^{13}$ und $S_{3,\text{part}} = 3 \cdot 10^{12}$. Der Reduktionsfaktor bezieht sich dabei auf die Testsuite, welche die Summe aller konkreten Szenarien über die betrachtete Anzahl funktionaler Szenarien umfasst.

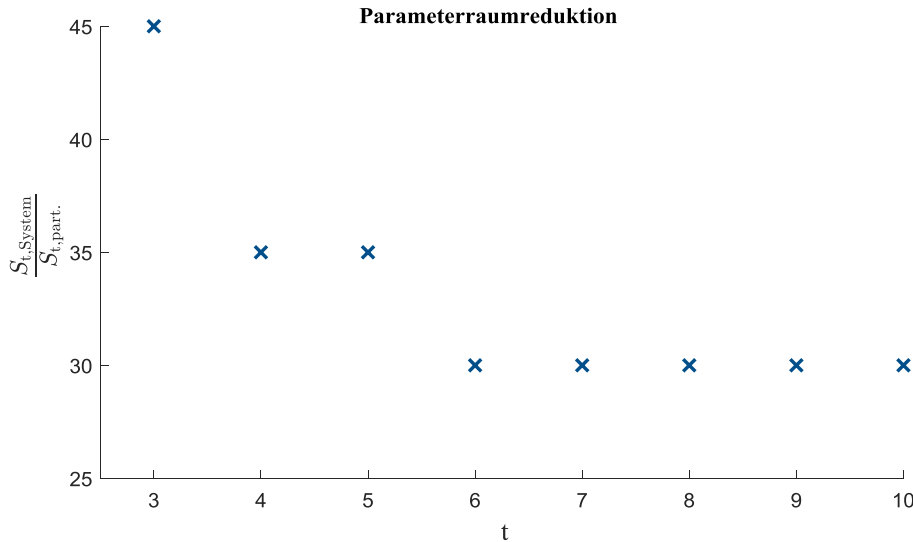


Abbildung 4-18: Reduktionspotenzial des Parameterraums durch funktionale Dekomposition

Die im Vergleich zur Betrachtung von Amersbach und Winner zum Teil abweichenden Verhältnisse lassen sich auf mehrere Ursachen zurückführen. Zum einen ist die Tatsache, dass der Faktor der Reduktion bei 3-weiser Testabdeckung in der vorliegenden Arbeit im Vergleich zur Betrachtung von Amersbach und Winner um einen Faktor von circa drei kleiner ist dadurch zu erklären, dass die in der vorliegenden Arbeit betrachtete Testsuite weniger umfangreich ist. Im Vergleich zu den innerhalb dieser Arbeit betrachteten zwei funktionalen Szenarien betrachten Amersbach und Winner neun funktionale Szenarien. Zum anderen ist der aus Abbildung 4-18 erkennbare gleichbleibende Reduktionsfaktor für Testabdeckungen ≥ 6 ebenfalls einerseits auf die weniger umfangreiche Testsuite, andererseits auf die Konfiguration der Instanzenanzahlen v_i zurückzuführen.

Im Detail steigert sich die Anzahl konkreter Szenarien für den Systemtest ab $t = 6$ jeweils um den Faktor 10, da die sieben- bis zehntgrößten Einflussparameter beider betrachteter funktionaler Szenarien jeweils eine Instanzenanzahl von $v_i = 10$ aufweisen. Für die von der Ebene der Informationsaufnahme dominierte Anzahl konkreter Szenarien für den korrespondierenden Partikulärtest liegen äquivalente Verhältnisse vor, sodass diese ab $t = 6$ ebenfalls um einen Faktor von 10 ansteigt. Aus diesem Grund resultieren identische Verhältnisse bezüglich des Reduktionsfaktors. Bei den Betrachtungen von Amersbach und Winner führt die höhere Anzahl funktionaler Szenarien mit einer entsprechend höheren Anzahl unterschiedlicher Instanzenanzahlen dazu, dass sich der Reduktionseffekt im Bereich der genannten Testabdeckungen verändert. Anzumerken ist, dass eine Änderung der Instanzenanzahl auch in diesem Falle nur die relativen Verhältnisse ändern würde. Überdies ist festzustellen, dass durch die angeführten Effekte bei Erhöhung der Anzahl betrachteter funktionaler Szenarien für den vorliegenden Anwendungsfall des TJC ebenfalls höhere Reduktionseffekte zu erwarten sind.

4.4.3 Deterministische Parametervariation

Das letzte Teilkapitel zur Definition konkreter Szenarien zeigt die exemplarische Implementierung einer deterministischen Parametervariation auf. Es sei darauf hingewiesen, dass diese Herausforderung nicht der Schwerpunkt der vorliegenden Aufgabenstellung ist und tiefergehender Betrachtungen bedarf. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird eine Parametervariation implementiert, welche auf dem Median x_{med} der zuvor definierten, wahrscheinlichkeitsbasierten Äquivalenzklassen beruht. In Abbildung 4-19 sind die auf diese Weise resultierenden Parameterwerte innerhalb der Kerndichteschätzung der kumulativen Dichtefunktion (CDF) dargestellt. Diese spezifizierten Parameterwerte sind anschließend zur Definition konkreter Szenarien innerhalb einer Testsuite heranzuziehen, mit welcher die Identifikation kritischer Szenarien im gekoppelten Simulationsframework erfolgt.

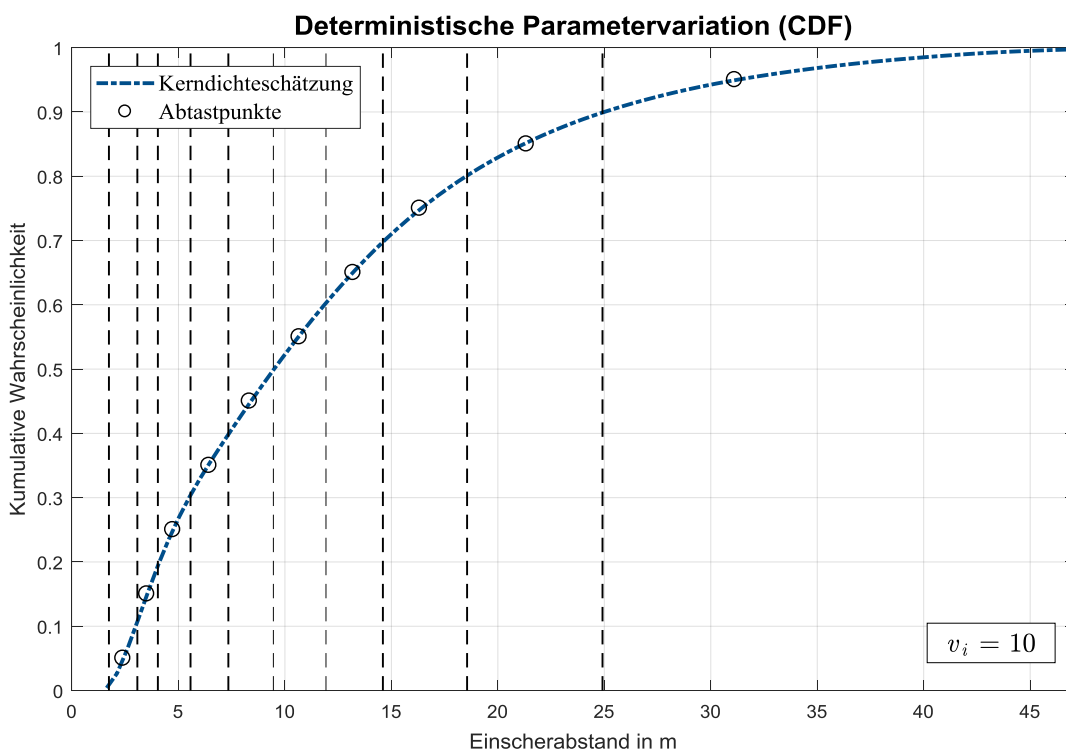


Abbildung 4-19: Implementierung einer deterministischen Parametervariation

5 Diskussion der Ergebnisse

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird eine Methode zur systematischen Auswahl logischer Szenarien und Überführung dieser in konkrete Szenarien entwickelt. Die Anwendbarkeit der entwickelten Methodik wird anhand der beiden funktionalen Szenarien *Einscherer* und *Stauauflösung* exemplarisch demonstriert. Innerhalb der Methodik wird die Methode der funktionalen Dekomposition zur Reduktion des Parameterraums angewandt. Die resultierende Reduktion wird objektiv durch den Vergleich zwischen entstehenden konkreten Szenarien bei einem Systemtest $S_{t,\text{System}}$ und jenen bei partikulärem Testen $S_{t,\text{part}}$ für verschiedene Testabdeckungen t aufgezeigt.

Die Hauptcharakteristika der entwickelten Methodik lassen sich somit einerseits durch die Systematisierbarkeit bezüglich der Ableitung logischer- sowie konkreter Szenarien und andererseits durch die mit der Methodik einhergehende Parameterraumreduktion benennen. Dabei wird der systematische Charakter in der Demonstration der Anwendbarkeit der Methodik unter Nutzung der verschiedenen Informationsquellen und Methoden deutlich. Ein offensichtlicher Reduktionseffekt des Parameterraums wird durch die Quantifizierung der Parameterraumreduktion durch partikuläres Testen bei Anwendung der funktionalen Dekomposition aufgezeigt. Hierbei lässt sich der Reduktionsfaktor auf 45 bei 3-weiser und 30 bei 10-weiser Testabdeckung beziffern. Die genannten Ergebnisse bestätigen jene der Untersuchungen von Amersbach und Winner²⁵⁸ durch Vorhandensein eines Reduktionseffekts. Abweichungen in der Höhe der Reduktion sind einerseits durch den im Rahmen dieser Arbeit im Vergleich zu Amersbach und Winner kleineren Umfang betrachteter funktionaler Szenarien zu erklären. Andererseits bedingt die Definition des von Amersbach und Winner nicht betrachteten funktionalen Szenarios *Stauauflösung* eine abweichende logische Beschreibung, welche zu einem veränderten Reduktionspotenzial über der Testabdeckung führt. Weiterhin sind die Abweichungen durch die in Kapitel 4.4.2 erläuterten, zum Teil abweichend definierten Instanzenanzahlen v_i einzelner Einflussparameter erklärbar.

Ein zweiter, weniger offensichtlicher Reduktionseffekt des Parameterraums durch die Methodik ergibt sich durch die Analyse der potenziellen Einflussparameter auf Basis statistischer Auswertungen. Durch die Ermittlung der Auftretenswahrscheinlichkeit des entsprechenden Parameters über dessen Wertebereich wird der im Voraus nicht quantifizierbare Wertebereich systematisch begrenzt, wobei eine Vergleichsmetrik zur Quantifizierung der damit einhergehenden Reduktion nicht gegeben ist. Die Reduktion ließe sich prinzipiell durch das Verhältnis des entstehenden Wertebereichs bei statistischer Auswertung im Vergleich zu dem durch Expertenwissen definierten Wertebereich bestimmen, wird in diesem Zusammenhang aber nicht als wissenschaftlich haltbare Quantifizierung betrachtet. Dennoch sei ausdrücklich auf die Wichtigkeit der Eingrenzung des Wertebereichs der verschiedenen Einflussparameter hingewiesen, da diese Grundlage einer systematischen Definition konkreter Szenarien ist.

²⁵⁸ Amersbach, C.; Winner, H.: Functional decomposition (2019).

Die Ergebnisse der Plausibilisierung der Verkehrssimulation anhand makroskopischer Verkehrsmetriken zeigen sowohl qualitativ als auch quantitativ eine Übereinstimmung mit im realen Straßenverkehr aufgezeichneten Daten für beide betrachteten funktionalen Szenarien.²⁵⁹ Es sei dabei auf die generellen Limitierungen der Plausibilisierung anhand makroskopischer Verkehrsmetriken hingewiesen. Es bleibt offen, inwieweit von einer Plausibilität auf makroskopischer Ebene der Verkehrssimulation auf eine Plausibilität der ermittelten Auftretenswahrscheinlichkeiten und Wertebereiche der Einflussparameter geschlossen werden kann. Hierbei ist neben der Beeinflussung der Auftretenswahrscheinlichkeiten und Wertebereiche der Einflussparameter durch etwaige, vom realen Straßenverkehr abweichende, dynamische Effekte auf der Ebene einzelner Fahrzeugbewegungen innerhalb der Verkehrssimulation die Beeinflussung durch die gegebene Implementierung und Parametrierung der Fahrermodelle zu nennen. Die vorliegende Implementierung der Fahrermodelle ist durch die in SUMO verfügbaren Modelle limitiert. Zudem basiert die fahrzeugtypspezifische Parametrierung – beispielsweise der Fahrzeugbreite – auf der Annahme über die Fahrzeugflotte normalverteilter Parameter. Dabei wurden die Zahlenwerte der Parameter der SUMO Dokumentation entnommen und können nicht als für die gesamte Fahrzeugflotte repräsentativ angesehen werden. Analoge Einschränkungen bezüglich der Repräsentativität gelten für das implementierte Straßennetzwerk sowie das Verkehrsaufkommen, welche jeweils nur eine Teilmenge der Verhältnisse des gesamten Straßenverkehrs abbilden.

Anhand der Ergebnisse der Analyse potenzieller Einflussparameter durch statistische Auswertungen wird deutlich wie unterschiedlich sich die Verteilungen verschiedener Einflussparameter bezüglich ihrer Lage- und Streuungsmaße darstellen. Eine Vorhersage dieser Verteilungen durch Expertenwissen ist als große Herausforderung anzusehen. Dennoch kann das vorhandene Expertenwissen genutzt werden, um Abhängigkeiten zwischen Parametern beispielsweise durch Ontologien²⁶⁰ zu modellieren. Hieraus ergibt sich ein weiterer Reduktionseffekt durch das Filtern in der Realität nicht möglicher Parameterkombinationen.

Durch die Ergebnisse der statistischen Auswertung lassen sich die Aussagen der Literatur bezüglich Zeit- und Kosteneinsparungen durch simulationsbasierte Anwendungen unterstützen. In der aktuellen Implementierung der Simulation werden auf einer Strecke von $L_{sn} = 3.7$ km circa 500 Fahrstreifenwechsel $N_{fw,sim}$ ausgewertet. Nach Entstehung der Stausituation liegt im subjektiv stationären Zustand ein Echtzeitfaktor von circa $f_{ez} = 4$ vor. Der Parallelisierungsfaktor wird konservativ zu $f_p = 1$ angenommen, ist jedoch nur durch die zur Verfügung stehende Hardware beschränkt. Unter der Annahme, dass im realen Straßenverkehr durchschnittlich $N_{fw,real} = 0.26$ 1/km Fahrstreifenwechsel durchgeführt werden²⁶¹ ergibt sich der in Formel (5-1) beschriebene Faktor der Zeitersparnis $f_{zeit,sim}$ durch die Simulation.

²⁵⁹ Vgl. Kap. 4.3.1.2 (Plausibilisierung).

²⁶⁰ Bagschik, G. et al.: Ontology based Scene Creation for the Development of Automated Vehicles.

²⁶¹ NHTSA: Examination of Naturalistic Lane-Changes (2004), S. 4.

$$f_{\text{zeit,sim}} = \frac{f_{\text{ez}} \cdot f_{\text{p}} \cdot N_{\text{fw,sim}}}{N_{\text{fw,real}} \cdot L_{\text{sn}}} \approx 2000 \quad (5-1)$$

Hierbei liegt die Annahme zu Grunde, dass der Zeitaufwand für Pre- und Postprocessing zwischen Realfahrt und Simulation identisch ist. Weiterhin sei auf den Vorteil der objektiven Sicht einer Szene durch die Simulation hingewiesen.²⁶² Zudem sei angemerkt, dass für andere funktionale Szenarien wie beispielsweise der Folgefahrt nicht nur eine Teilmenge der Fahrzeuge der Simulation wie im Falle des funktionalen Szenarios *Einscherer* relevant für die Auswertung ist und dadurch eine noch größere Zeitersparnis durch die Simulation zu erwarten ist.

Der Ergebnisse der Untersuchung des Einflusses verschiedener Durchdringungsgrade automatisierter Fahrzeuge in der Verkehrssimulation bieten großen Interpretationsspielraum und bedürfen, wie bereits im entsprechenden Kapitel erwähnt, tiefergehender Betrachtungen. Das hohe Absinken des Medians der Einscherabstände bei bereits kleiner Durchdringung von automatisierten Fahrzeugen könnte sich dadurch ergeben, dass durch die dann vorhandenen teilweise größeren Sicherheitsabstände der automatisierten Fahrzeuge Lücken entstehen, welche durch die menschlichen Fahrzeugführenden ausgenutzt werden. Dass währenddessen die Gesamtanzahl an Fahrstreifenwechseln abnimmt erscheint widersprüchlich, könnte allerdings auf das insgesamt niedrigere Niveau der Durchschnittsgeschwindigkeiten zurückzuführen sein, aus welchem global sehr niedrige durchschnittliche Abstände zwischen den Fahrzeugen resultieren könnten. Die Tatsache, dass der Median der Einscherabstände bei weiterer Erhöhung der Durchdringung ansteigt könnte durch die dann vorliegende signifikante Durchdringung automatisierter Fahrzeuge und die Auswirkungen von deren normativem Fahrverhalten erklärbar sein. Das kontinuierliche Absinken des Medians der Durchschnittsgeschwindigkeit bei Erhöhung der Durchdringung automatisierter Fahrzeuge bei gleichzeitiger Erhöhung der absoluten Anzahl an Fahrstreifenwechseln erscheint dennoch widersprüchlich. Das insgesamt zu beobachtende Absinken der zentralen Quartilsabstände der Verteilungen bei einer vorliegenden Durchdringung automatisierter Fahrzeuge im Vergleich zu dem Zustand ohne diese erscheint schlüssig und könnte auf einen makroskopischen Effekt des normativen Verhaltens automatisierter Fahrzeuge hinweisen. Es sei nochmals auf die Erläuterungen bezüglich der Limitierungen der Darstellungen im entsprechenden Kapitel 4.3.2.2 verwiesen.

Die Ergebnisse der Definition konkreter Szenarien zeigen auf, dass es auf Basis statistischer Auswertungen möglich ist Diskretisierungsfunktionen für die ausgewählten Einflussparameter zu generieren. Der entwickelte Ansatz ermöglicht es dabei unabhängig von der benötigten Instanzenanzahl v_i pro Parameter sogenannte wahrscheinlichkeitsbasierte Äquivalenzklassen innerhalb des Wertebereichs des entsprechenden Einflussparameters zu erzeugen. Die auf diese Weise entstehenden Äquivalenzklassen bilden die Basis der deterministischen Parametervariation, welche innerhalb jeder Äquivalenzklasse einen Wert festlegt, der für die nachfolgende Definition der konkreten Szenarien genutzt wird. Die Gesamtheit der konkreten Szenarien bildet die Testsuite, welche im gekoppelten Simulationsframework zur Identifikation kritischer Szenarien verwendet wird. Es sei darauf hingewiesen,

²⁶² Vgl. Kap. 3.2.3.2 (Statistische Auswertungen).

dass neben der Kerndichteschätzung auch Verfahren der schließenden Statistik zur Schätzung der Wahrscheinlichkeitsverteilung der analysierten Einflussparameter anwendbar sein können.²⁶³

Da die Frage nach einer hinreichenden Anzahl konkreter Szenarien, welche zur Freigabe der entsprechenden Fahrfunktion zu testen ist, weiterhin offen ist, bedingt dies eine nach heutigem Stand auf Expertenwissen beruhende Definition benötigter Instanzenanzahlen v_i der entsprechenden Einflussparameter. Die Tatsache des bereits in der Einleitung erläuterten Fehlens eines allgemein anerkannten metrischen Validitätskriteriums für die Güte einer höher automatisierten Fahrfunktion oder für die Kritikalität eines Szenarios stellt weiterhin eine offene Forschungsfrage dar.

Solange diese Forschungsfrage unbeantwortet bleibt könnte die Anwendung der Methode der Einflussmatrix nach Vester²⁶⁴ ein Zwischenschritt der weiteren Systematisierung der entwickelten Methodik bezüglich dieses Teilaspekts darstellen. Diese basiert ebenfalls auf Expertenwissen, systematisiert dieses jedoch und liefert quantitative Ergebnisse bezüglich der gegenseitigen Beeinflussung und Beeinflussbarkeit der verschiedenen betrachteten Parameter. Die für das funktionale Szenario *Einscherer* erstellte Einflussmatrix findet sich in Kapitel A.4 des Anhangs. Im Detail beschreibt die Einflussmatrix auf Zeilenebene den Einfluss des entsprechenden Einflussparameters auf die auf Spaltenebene angeordneten anderen Einflussparameter. Die Skala zur Quantifizierung der Einflussnahme reicht von 0 bis 3, wobei eine 0 zu vergeben ist, wenn eine Änderung des Einflussparameters A zu keiner direkten Änderung des Einflussparameters B führt. Eine 1 repräsentiert einen unterproportionalen Einfluss von Einflussparameter A auf Einflussparameter B, eine 2 einen proportionalen Einfluss und eine 3 einen überproportionalen Einfluss. Den Diagonalelementen der Matrix wird kein Wert zugeordnet, da diese den Einfluss eines Parameters auf sich selbst repräsentieren würden. Am rechten Rand der Matrix lässt sich in der Spalte „AS“ (Aktivsumme) die Summe des Einflusses ablesen, welchen der zur entsprechenden Zeile korrespondierende Einflussparameter auf die anderen Einflussparameter besitzt. Analog findet sich am unteren Ende der Matrix die Zeile „PS“ (Passivsumme), deren Einträge die Summe der Beeinflussung des jeweiligen Parameters durch die restlichen Einflussparameter darstellen. Als Maß für die Kritikalität wird in der Spalte „P“ das Produkt aus Aktiv- und Passivsumme gebildet. Der Quotient aus Aktiv- und Passivsumme gibt Aufschluss über vorwiegende Aktivität (Wert > 100) oder vorwiegende Passivität.²⁶⁴

Zur Interpretation der Ergebnisse dient Abbildung 5-1. Innerhalb dieser ist die Einflussnahme über der Beeinflussbarkeit aufgetragen. Die Aufteilung in die Quadranten kritisch, aktiv, puffernd und reaktiv erfolgt nicht in der Mitte der Achsen, sondern am jeweiligen Median, um eine Robustheit gegenüber dem Einfluss von Ausreißern zu erreichen. Da die besonders aktiven sowie tendenziell kritischen Parameter nach Vester die relevantesten Einflussparameter des Systems darstellen wird in der Darstellung die entsprechende Parameterbezeichnung mit angegeben. Für die Zuordnung der restlichen Einflussparameter zur Abbildung sei aus Gründen der Übersichtlichkeit auf die Einflussmatrix im Anhang verwiesen. Es wird deutlich, dass Einflussparameter aller betrachteten Ebenen des 6-Ebenen-Modells innerhalb der Gruppe der relevanten Parameter vertreten sind. Unter der Annahme, dass

²⁶³ Cramer, E.; Kramps, U.: Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik (2017), S. 259 ff.

²⁶⁴ Vester, F.: Die Kunst, vernetzt zu denken (2001), S. 157 ff.

das Produkt aus Beeinflussung und Beeinflussbarkeit eines Parameters innerhalb des Parameterraums mit der Kritikalität des entsprechenden Einflussparameters korreliert ist durch diese Methode eine systematische, wenn auch weiterhin auf Expertenwissen basierende Ableitung der relativen Verhältnisse der Instanzenanzahlen v_i möglich. Für tiefergehende Erläuterungen der Methodik sei auf die Literatur verwiesen.²⁶⁴ Zur Bewertung der Validität dieses Ansatzes sind weiterführende Untersuchungen durchzuführen.

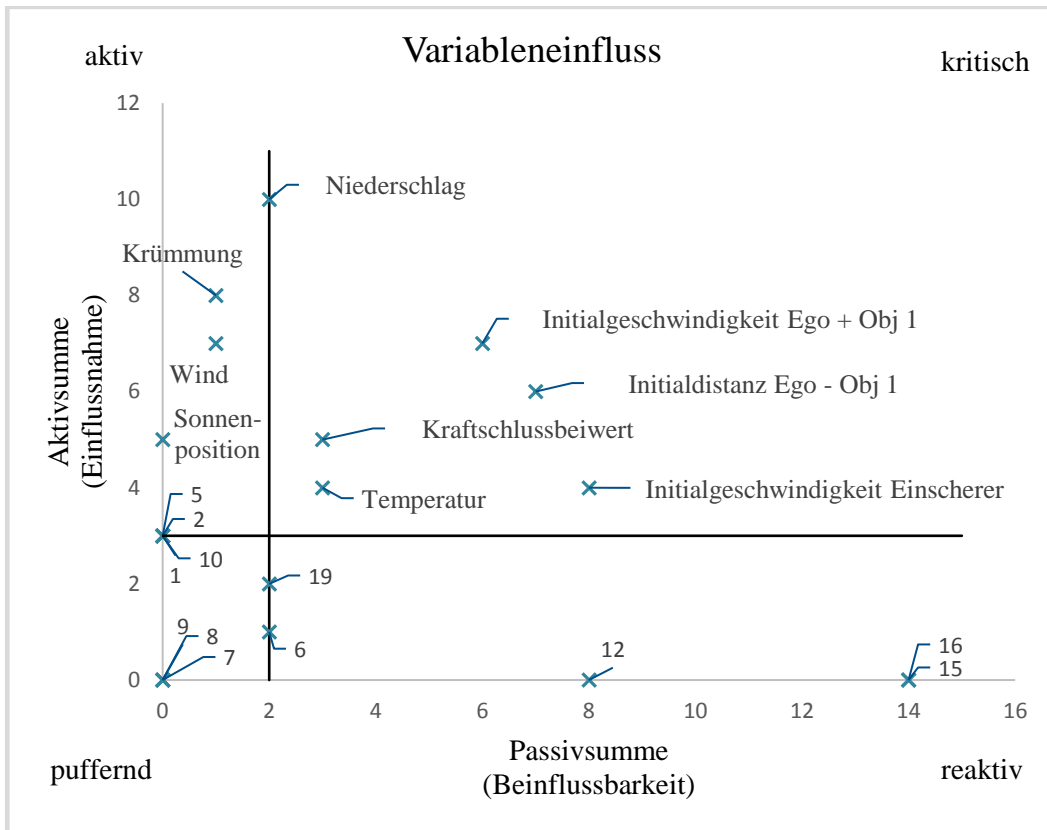


Abbildung 5-1: Ergebnisinterpretation der Einflussmatrix

Zum Abschluss dieses Kapitels erfolgt auf Basis der in Kapitel 3.1 definierten Anforderungen, der Erkenntnisse aus der Anwendung der Methodik sowie der vorangegangenen Ausführungen eine zusammenfassende Bewertung der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Methodik. Die Erfüllung bezüglich der gestellten Effizienzkriterien ist insgesamt als gut zu bewerten. Dies ist zum einem auf die aus Formel (5-1) resultierende Zeitersparnis durch die Anwendung in der Simulation und damit zu erwartende, einhergehende Kostenersparnisse zu begründen, die zu einer ökonomischen Methodik führen. Dabei ist die Reproduzierbarkeit durch die verwendeten Pseudozufallszahlengeneratoren innerhalb der Simulation gewährleistet. Die Methode ist wie demonstriert ohne Vorliegen des Modells der Fahrfunktion oder des Quellcodes und damit frühzeitig im Entwicklungsprozess einsetzbar. Es sei dennoch darauf hingewiesen, dass im Laufe des Entwicklungsprozesses verfügbare Informationen nutzbringend eingesetzt werden können, um die Repräsentativität der Methode weiter zu steigern. So kann bei Vorliegen eines Modells der zu entwickelten Fahrfunktion beispielsweise eine Plausibilisierung ausgewählter Einflussparameter erfolgen.

Die Erfüllung der den Effektivitätskriterien zuzuordnenden Forderung nach Repräsentativität wird durch die Methode im Rahmen der gegebenen Ressourcen maximiert. Einflussparameter der Repräsentativität sind dabei die Randomisierung der Simulation, die Verwendung eines realen Straßennetzwerks und des zugehörigen Verkehrsaufkommens sowie die Plausibilisierung der Simulation durch makroskopische Verkehrsmetriken. Hierbei erhebt die entwickelte Methodik ausdrücklich keinen Anspruch auf Repräsentativität, da beispielsweise nur ein kleiner Teil des realen Straßennetzwerks sowie des zugehörigen Verkehrsaufkommens innerhalb der Simulation abgebildet wird und die Frage der Validität der in der Simulation verwendeten Modelle gesonderten Untersuchungen bedarf. Eine weitere Limitierung ergibt sich durch die begrenzt darstellbare Simulationszeit aufgrund der zur Verfügung stehenden Rechenkapazität. In Bezug auf die Forderung nach Variierbarkeit bietet die Methodik prinzipiell die Möglichkeit alle definierten Testfälle umzusetzen, jedoch bleibt die Frage, wie viele Instanzenanzahlen v_i für die verschiedenen Parameter hinreichend sind, offen. Durch die Abbildung der Methodik innerhalb der Simulation bietet diese Vorteile in Hinblick auf die Beobachtbarkeit der relevanten Einflussparameter. Die Ergebnisse zeigen auf, dass es möglich ist sämtliche Einflussparameter der Ebenen eins, zwei und vier auszuwerten. Einschränkend anzumerken ist, dass die Methodik nicht in der Lage ist die Parameter der Umweltbedingungen auszuwerten.

Die Kriterien durch die gegebenen Randbedingungen sowie die Aufgabenstellung sind als erfüllt anzusehen. Die entwickelte Methodik ist vollständig im vorhandenen Simulationsframework abgebildet und erweitert die Methode von Hallerbach et al.²⁶⁵ um eine Methode zur systematischen Ableitung logischer Szenarien und Definition konkreter Szenarien. Die Methode der funktionalen Dekomposition ist in die entwickelte Methodik integriert und die resultierende Reduktion des Parameterraums quantifiziert. Die resultierenden Parameterräume und Testumfänge werden für die exemplarischen funktionalen Szenarien für verschiedene Testabdeckungen bestimmt. Sich darüber hinaus durch die entwickelte Methodik ergebende Reduktionseffekte sind vorhanden und wurden erläutert, können allerdings aufgrund einer fehlenden Vergleichsmetrik nicht wissenschaftlich fundiert quantifiziert werden.

²⁶⁵ Hallerbach, S. et al.: Simulation-Based Identification of Critical Scenarios (2018).

6 Fazit und Ausblick

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit war die Reduktion des Parameterraums für die Freigabe von höher automatisierten Fahrfunktionen. Zur Umsetzung dieser Aufgabe lag zu Beginn der Arbeit ein Simulationsframework zur Identifikation kritischer Szenarien vor, in welchem eine Verkehrssimulation mit einer Fahrdynamiksimulation gekoppelt wird. Da dieses Simulationsframework nur für ein manuell definiertes konkretes Szenario ausführbar war, bestand die Aufgabenstellung dieser Arbeit im Detail darin eine Methode zu entwickeln, welche eine systematische Ableitung logischer Szenarien auf Basis funktionaler Szenarien ermöglicht, die anschließend in konkrete Szenarien überführt werden können. Die Methode hatte zudem in der Lage zu sein den zugehörigen Parameterraum eines logischen Szenarios sowie den benötigten Testumfang zu bestimmen. Weiterhin war die Methode der funktionalen Dekomposition zur Reduktion des Parameterraums anzuwenden und die einhergehende Reduktion mit objektiven Kenngrößen zu bestätigen. Abschließend hatte eine Demonstration der Anwendbarkeit der entwickelten Methode im gegebenen Simulationsframework zu erfolgen.

Die grundsätzliche Herausforderung bildet dabei die sogenannte Parameterraumexplosion, welche durch die progressive Abhängigkeit möglicher konkreter Szenarien von sowohl der Parameteranzahl p_i als auch deren Instanzen v_i beschrieben wird. Dieser Umstand führt im Falle des funktionalen Szenarios der Fahrfahrt bereits zu $S_N = 4 \cdot 10^{18}$ möglichen konkreten Szenarien, welches nur eine Teilmenge der für eine höher automatisierte Fahrfunktion zu betrachtenden funktionalen Szenarien darstellt. Die resultierende Anzahl konkreter Szenarien, welche für die Freigabe einer höher automatisierten Fahrfunktion theoretisch vor einer Markteinführung getestet werden müsste ist nicht zu bewältigen.

Zur Lösung der vorliegenden Aufgabenstellung wurden nach einer umfangreichen Literaturrecherche Anforderungen definiert, welche die zu entwickelnde Methodik zu erfüllen hat. Der sich aus der Literaturrecherche ergebende Stand der Technik wurde kategorisiert und die ermittelten Informationsquellen und Methoden zur Lösung der Aufgabenstellung anhand der gestellten Anforderungen bewertet. Das Ergebnis dieser Bewertung war die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methodik, welche sich in die Prozessschritte *Definition relevanter funktionaler Szenarien*, *Auswahl potenzieller Einflussparameter*, *Analyse potenzieller Einflussparameter* sowie *Definition konkreter Szenarien* gliedert. Innerhalb des jeweiligen Prozessschritts werden verschiedene Informationsquellen und Methoden herangezogen, welche sich aufgrund der vorherigen Bewertung als am besten zur Lösung der Problemstellung geeignet herausgestellt haben.

Das detaillierte Vorgehen bei der Anwendung der Methodik basierte auf den exemplarisch definierten funktionalen Szenarien *Einscherer* und *Stauauflösung*, für die potenzielle Einflussparameter ausgewählt wurden. Nach Implementierung und Plausibilisierung einer stochastischen Verkehrssimulation für Stausituationen wurden die Auftretenswahrscheinlichkeiten und Wertebereiche ausgewählter Einflussparameter der stationären Elemente und der beweglichen Objekte durch statistische Auswertung ermittelt. Diese statistische Auswertung bildete die Basis für die Entwicklung eines Ansatzes zur Generierung von Diskretisierungsfunktionen der ausgewählten Einflussparameter. Zudem wurde die

Methode der funktionalen Dekomposition auf die Parameterräume der logischen Szenarien *Einscherer* und *Stauauflösung* angewandt und eine Reduktion der Parameterräume herbeigeführt. Auf Grundlage der generierten Diskretisierungsfunktionen konnte anschließend eine deterministische Parametervariation implementiert werden. Diese legt innerhalb der, durch die entsprechende Diskretisierungsfunktion definierten, wahrscheinlichkeitsbasierten Äquivalenzklassen des betrachteten Einflussparameters jeweils einen Parameterwert fest. Die auf diese Weise spezifizierten Parameterwerte definieren die konkreten Szenarien, welche anschließend in der gekoppelten Simulation zur Identifikation kritischer Szenarien herangezogen werden.

Durch die funktionale Dekomposition konnte im Rahmen der exemplarischen Anwendung für die Testsuite, welche die funktionalen Szenarien *Einscherer* und *Stauauflösung* umfasst, ein Reduktionsfaktor des Parameterraums zwischen 45 bei 3-weißer und 30 bei 10-weißer Testabdeckung erreicht werden. Dabei ist anzumerken, dass bei einer höheren Anzahl betrachteter funktionaler Szenarien eine weitere Erhöhung der Reduktionseffekte, abhängig von der gewählten Testabdeckung, zu erwarten ist. Zudem wurde aufgezeigt, dass eine systematische Ableitung logischer Szenarien und Definition konkreter Szenarien im Rahmen einer simulationsbasierten Anwendung möglich ist. Dabei ergab sich durch die statistische Auswertung ein weiterer Reduktionseffekt des Parameterraums durch die Begrenzung der Wertebereiche der verschiedenen Einflussparameter. Da eine objektive Vergleichsmetrik nicht vorhanden ist kann die damit einhergehende Reduktion nicht quantifiziert werden. Für den Fall des funktionalen Szenarios *Einscherer* ergab sich unter getroffenen Annahmen eine Zeiterparnis um den Faktor $f_{\text{Zeit,sim}} = 2000$ durch die statistische Auswertung in der Simulation im Vergleich zur Realfahrt. Der Ansatz der Diskretisierung der Einflussparameter auf Basis der statistischen Auswertung unter Nutzung der Quantilfunktion zeigt das Potenzial der Methode auf, wobei die Anzahl der pro Einflussparameter benötigten Instanzen v_i offen bleibt.

Die zusätzliche Untersuchung des Einflusses des Durchdringungsgrads automatisierter Fahrfunktionen auf exemplarische Einflussparameter in der Verkehrssimulation zeigte eine deutliche Veränderung der Lage- und Streuungsmaße dieser Einflussparameter in Abhängigkeit des Durchdringungsgrads auf. Die Ergebnisse stellten sich durch teilweise den Erwartungen entsprechende und teilweise widersprüchliche Verläufe dar.

Auf Grundlage der Erkenntnisse dieser Arbeit lassen sich verschiedene Forschungsfragen ableiten, welche einer Untersuchung innerhalb zukünftiger Arbeiten bedürfen. Dabei sind zunächst Verbesserungspotenziale der aktuellen Implementierung der entwickelten Methodik in Hinblick auf deren Repräsentativität zu nennen. Ein diesem Themenbereich zuzuordnender Aspekt ist eine tiefergehende Betrachtung der Parametrierung der Fahrzeugattribute, für welche beispielsweise statistische Auswertungen von Realdaten genutzt werden könnten. Weitere Erhöhungen bezüglich der Repräsentativität ließen sich erzielen, wenn der Umfang des der Verkehrssimulation zu Grunde liegenden Streckennetzwerks vergrößert wird. Zudem wird in der aktuellen Implementierung des Verkehrsaufkommens auf Basis der Dauerverkehrszählung der BASt die Annahme getroffen, dass sich im Falle von An- und Abzweigungen verschiedener Fahrstreifen einer Richtungsfahrbahn nach der jeweiligen Zählstelle das Verkehrsaufkommen im Verhältnis der Fahrstreifenanzahl aufteilt. Die Repräsentati-

vität des Verkehrsaufkommens könnte gesteigert werden, indem für das betrachtete Streckennetzwerk Verkehrszählstationen an sämtlichen An- und Abzweigungen der Richtungsfahrbahnen installiert würden. Hierdurch wäre eine exakte Quantifizierung des in der Realität vorhandenen Verkehrsaufkommens des betrachteten Streckenabschnitts möglich. Eine Alternative zur Erfassung realen Verkehrsaufkommens bilden Videoaufzeichnungen unter Nutzung von Drohnen.²⁶⁶

Ein weiterer Anknüpfungspunkt zur Erhöhung der Repräsentativität ist die Plausibilisierung der Verkehrssimulation auf der Ebene einzelner Fahrzeuge, welche durch den Vergleich der ermittelten Auftretenswahrscheinlichkeiten und Wertebereiche der verschiedenen Einflussparameter mit Realdaten möglich wäre. Weiterhin könnte die Randomisierung und damit einhergehend die Repräsentativität durch Variation der Startwerte des Pseudozufallszahlengenerators sowie durch höhere Simulationszeiten gesteigert werden.

In Bezug auf die Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Durchdringungsgrade automatisierter Fahrfunktionen auf die Auftretenswahrscheinlichkeiten und Wertebereiche verschiedener Einflussparameter innerhalb der Verkehrssimulation bestehen die im vorherigen Kapitel erläuterten Limitierungen bezüglich der Modellvalidität. Die Repräsentativität der innerhalb dieser Untersuchung generierten Daten ließe sich erhöhen, indem die automatisierten Fahrzeuge innerhalb der gekoppelten Verkehrs- und Fahrdynamiksimulation von durch CarMaker eingesetzten Fahrzeugen anstelle von durch SUMO eingesetzten Fahrzeugen angenähert würden. Bei Vorliegen komplexerer Modelle automatisierter Fahrfunktionen der CarMaker-Fahrzeuge im Vergleich zu den in SUMO implementierten Modellen würde hieraus eine Erhöhung der Repräsentativität der generierten Daten resultieren. Dies ginge allerdings mit einer Steigerung des Rechenaufwands einher. Zusätzlich sei angemerkt, dass die bestehenden XiL-Methoden herangezogen werden können, um die Validität der entwickelten Methodik zu überprüfen. Weiterhin wäre es wünschenswert Falsifizierungsversuche der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen in einem anderen Simulationsframework durchzuführen.

Neben den genannten Verbesserungspotenzialen der aktuellen Implementierung der entwickelten Methodik in Hinblick auf deren Repräsentativität sind zudem Verbesserungspotenziale in Bezug auf deren Umfang zur Abbildung der Gesamtheit einer Szenarienbeschreibung zu nennen. Hierunter fällt beispielsweise die Tatsache, dass die aktuelle Implementierung der Methodik nicht in der Lage ist die Parameter der Umweltbedingungen zur systematischen Ableitung logischer Szenarien heranzuziehen. Es ist anzumerken, dass dieser Umstand nicht auf eine Limitierung der Charakteristika der Methodik zurückzuführen ist, sondern daher rührt, dass weder in SUMO noch in CarMaker physikalische Modelle implementiert sind, welche die Umweltbedingungen abbilden. Die Implementierung eines solchen Modells im Kontext der Absicherung höher automatisierter Fahrzeuge ist nach derzeitigem Kenntnisstand nicht bekannt. Weiterhin stellt die Modellierung der Umweltbedingung in diesem Kontext eine Forschungsfrage dar, welcher in zukünftigen Projekten wie beispielsweise dem

²⁶⁶ Krajewski, R. et al.: The highD Dataset (2018).

Projekt VV²⁶⁷-Methoden weiter nachgegangen wird. Anknüpfungspunkt dieser Untersuchungen könnten beispielsweise statistische Auswertungen des Deutschen Wetterdienstes sein.

Eine weitere Erhöhung der Parameterraumreduktion durch die Methodik kann möglich sein, indem bestehende Abhängigkeiten zwischen den vorliegenden Einflussparametern modelliert werden. Dies kann durch in den vorherigen Kapiteln beschriebene Ontologien auf Basis von Expertenwissen erfolgen. Zudem könnte eine Quantifizierung dieser Abhängigkeiten durch Korrelationsanalysen auf Grundlage der statistischen Auswertung der verschiedenen Einflussparameter innerhalb dieser Arbeit diesen Vorgang unterstützen.

Im Gesamtkontext der Absicherung höher automatisierter Fahrfunktionen bleibt die Frage nach einer hinreichenden Anzahl konkreter Szenarien, welche zur Freigabe der entsprechenden Fahrfunktion zu testen sind, weiterhin offen. Dies bedingt eine nach heutigem Stand auf Expertenwissen beruhende Definition benötigter Instanzenanzahlen v_i der entsprechenden Einflussparameter. Die in diesem Zusammenhang bereits in der Einleitung als größte Herausforderung angeführte Problematik des Fehlens eines allgemein anerkannten metrischen Validitätskriteriums für die Güte einer höher automatisierten Fahrfunktion oder für die Kritikalität eines Szenarios bildet dabei den zentralen Forschungsgegenstand. Läge dieses metrische Validitätskriterium vor, könnten die Sensitivitäten einzelner Parameter bestimmt und auf dieser Basis die benötigten Instanzenanzahlen abgeleitet werden. Dieser Vorgang würde zudem eine weitere Erhöhung der Systematisierung der entwickelten Methodik bei gleichzeitiger Reduktion des Anteils an Expertenwissen ermöglichen. Ein Zwischenschritt der Systematisierung könnte dabei in der Anwendung der in der Diskussion der Ergebnisse vorgestellten Methode der Einflussmatrix nach Vester liegen. Diese basiert ebenfalls auf Expertenwissen, systematisiert dieses jedoch und liefert quantitative Ergebnisse bezüglich der gegenseitigen Beeinflussung und Beeinflussbarkeit der verschiedenen Einflussparameter eines Szenarios.

Abschließend bleibt anzumerken, dass die getroffenen Aussagen dieser Arbeit auf der Annahme beruhen, dass konkrete Szenarien mit einer höheren Auftretenswahrscheinlichkeit auch jene mit einer höheren Relevanz für die Serienfreigabe darstellen, da Szenarien, welche in der Realität häufiger auftreten eine stärkere Gewichtung innerhalb der Testsuite erfahren. Dieser Ansatz erscheint auch in Hinblick auf die gesellschaftliche Akzeptanz der Sicherheitsargumentation plausibel. Dennoch bleibt die Frage offen, ob die Auftretenswahrscheinlichkeit einziger Einflussfaktor der Relevanz eines Szenarios ist oder ob weitere Faktoren, wie beispielsweise die Schadensschwere im Falle des Versagens der betrachteten Fahrfunktion, als Einflussfaktoren auf die Relevanz eines Szenarios anzusehen sind.

²⁶⁷ Validierung und Verifikation.

Anhang

A.1 Analyse der Einflussparameter der stationären Elemente

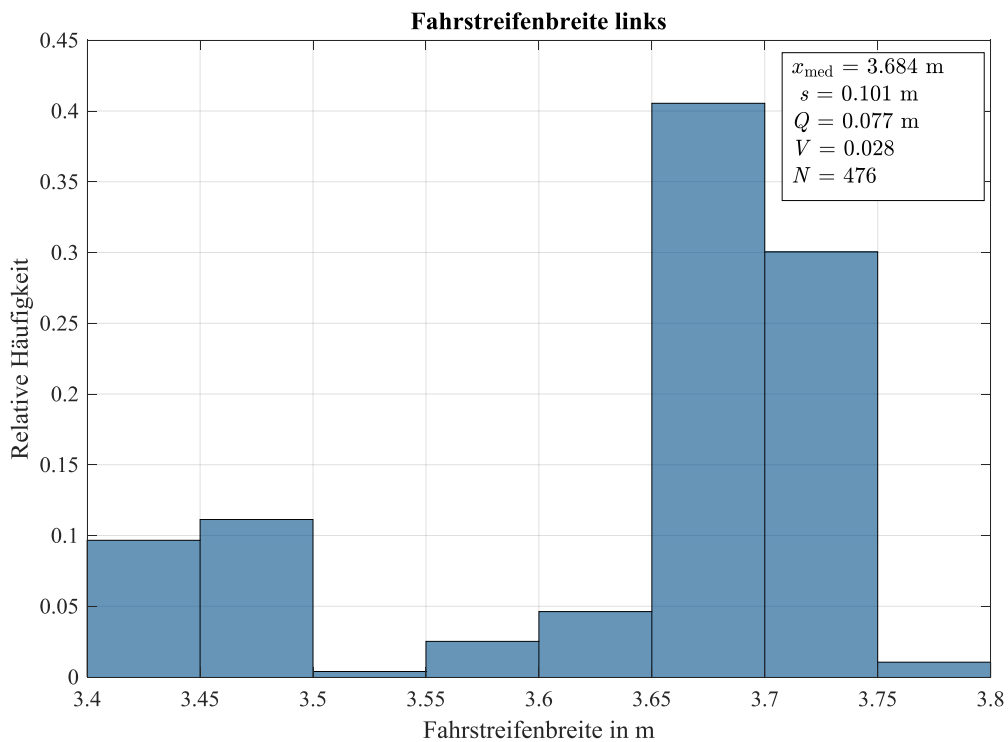


Abbildung A-1: Statistische Auswertung - Fahrstreifenbreite links

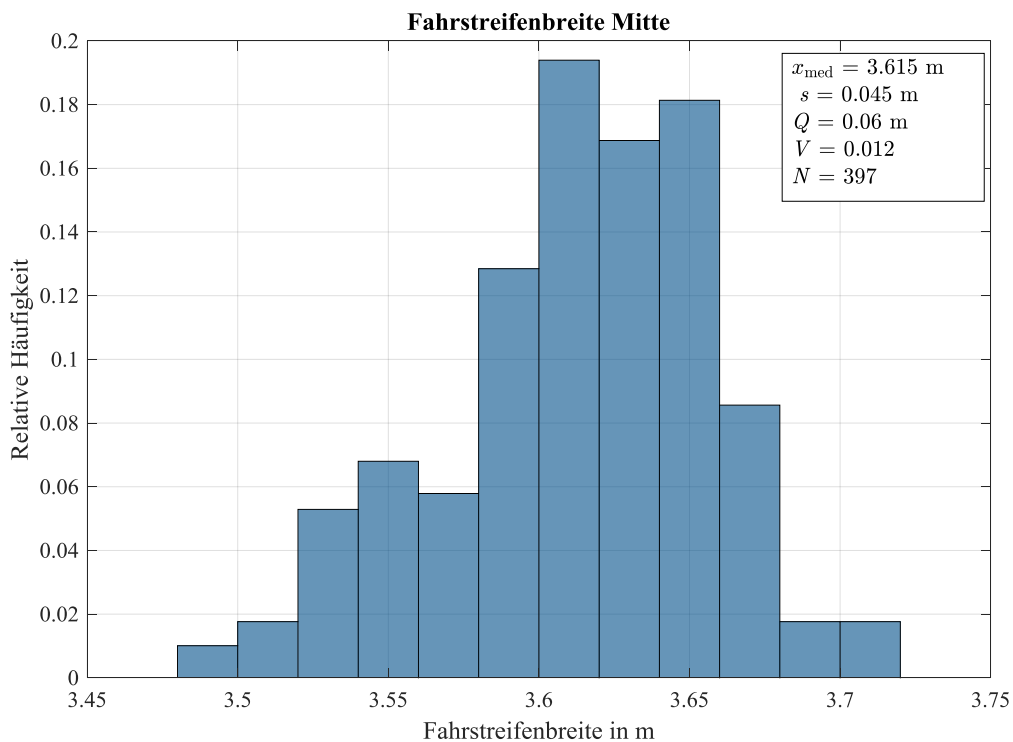


Abbildung A-2: Statistische Auswertung – Fahrstreifenbreite Mitte

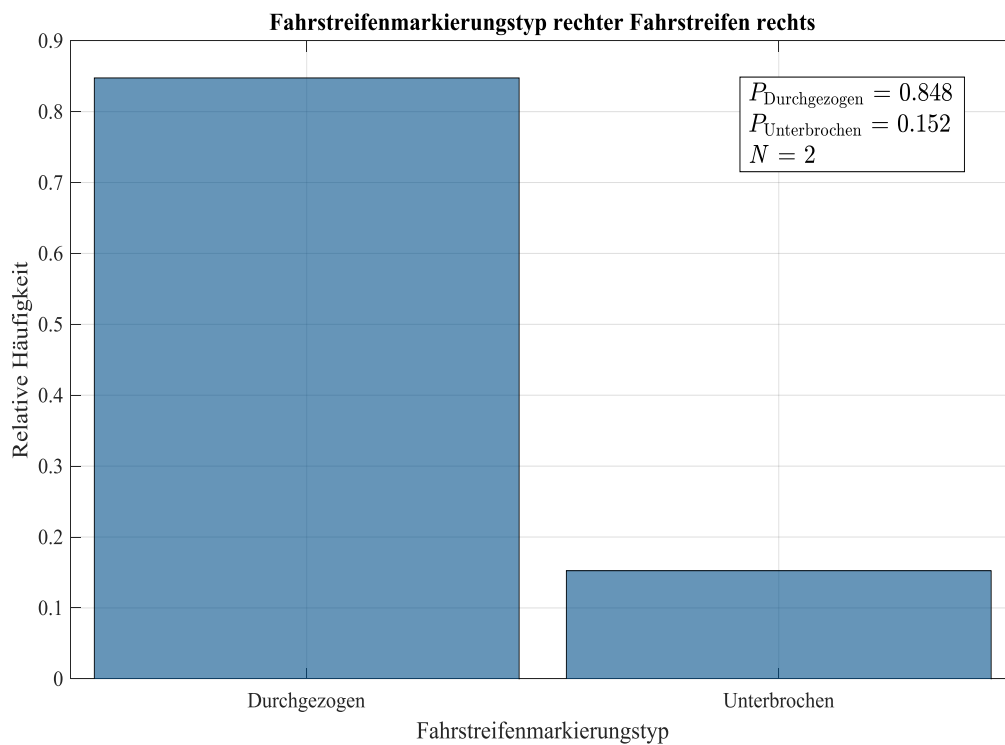


Abbildung A-3: Statistische Auswertung – Fahrstreifenmarkierungstyp rechte Seite des rechten Fahrstreifens

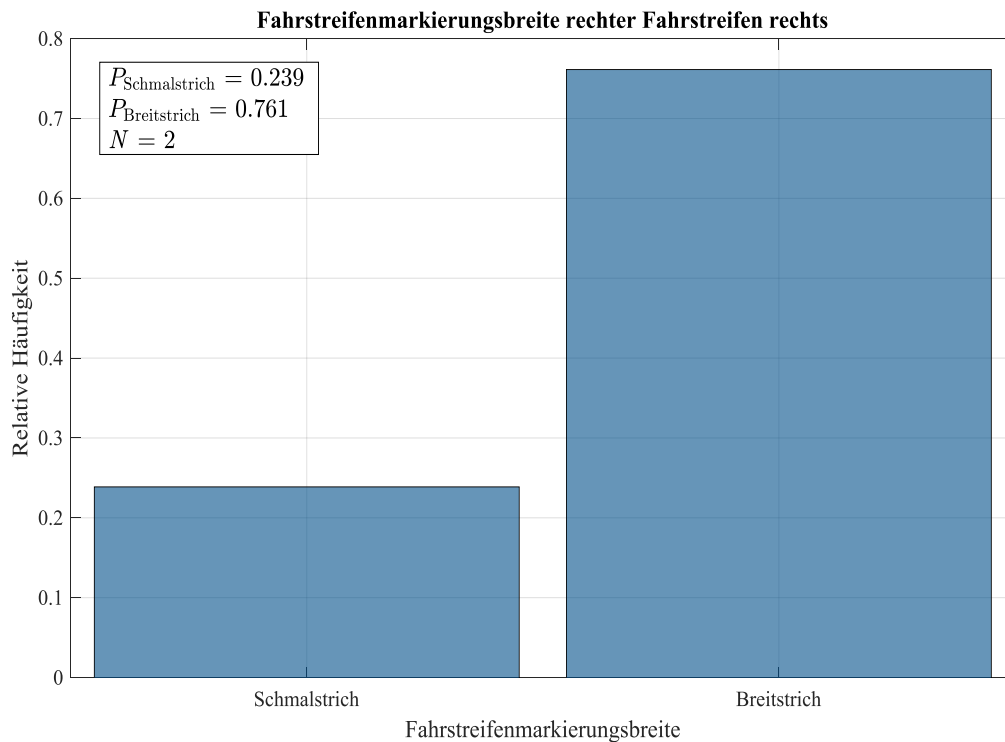


Abbildung A-4: Statistische Auswertung – Fahrstreifenmarkierungsbreite rechte Seite des rechten Fahrstreifens

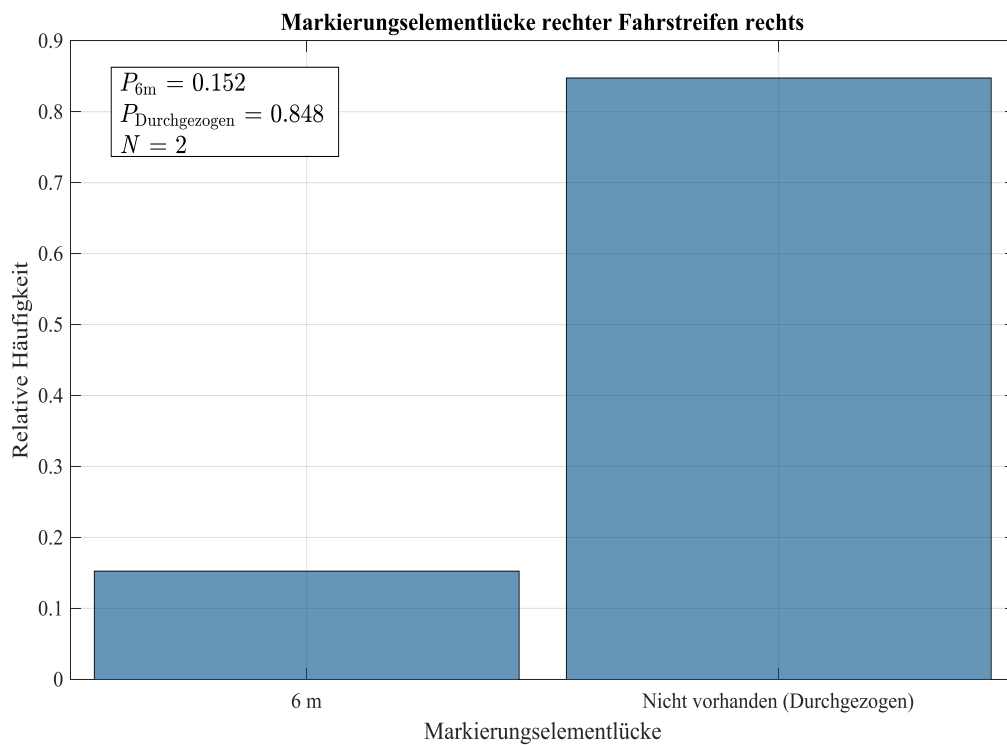


Abbildung A-5: Statistische Auswertung – Markierungselementlücke rechte Seite des rechten Fahrstreifens

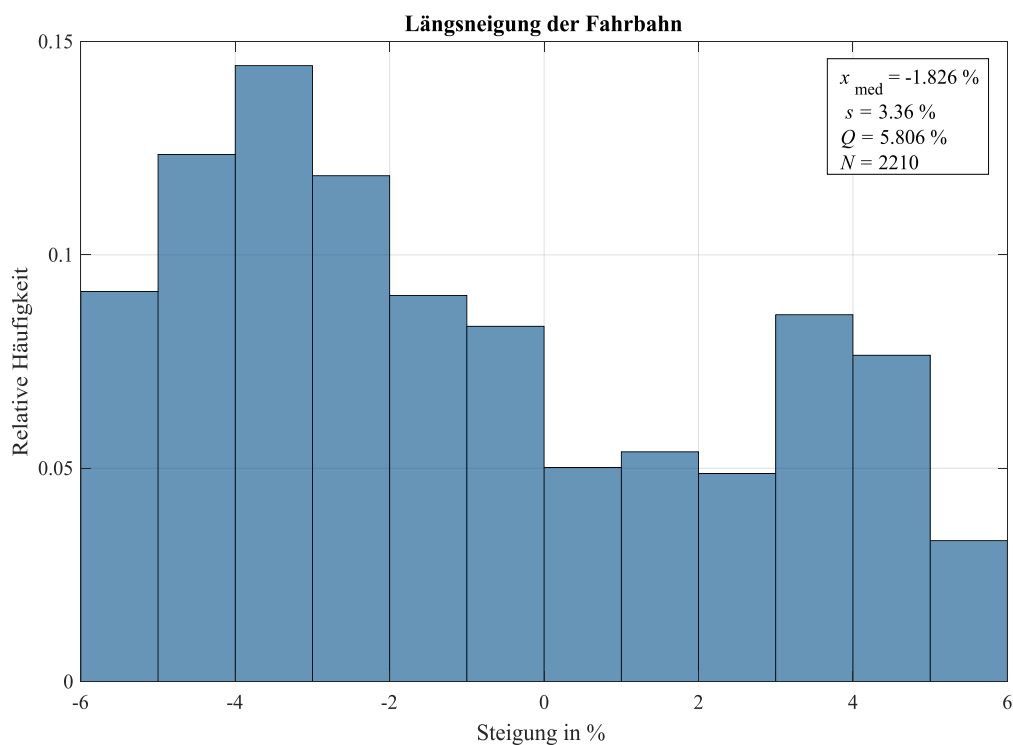


Abbildung A-6: Statistische Auswertung – Längsneigung der Fahrbahn

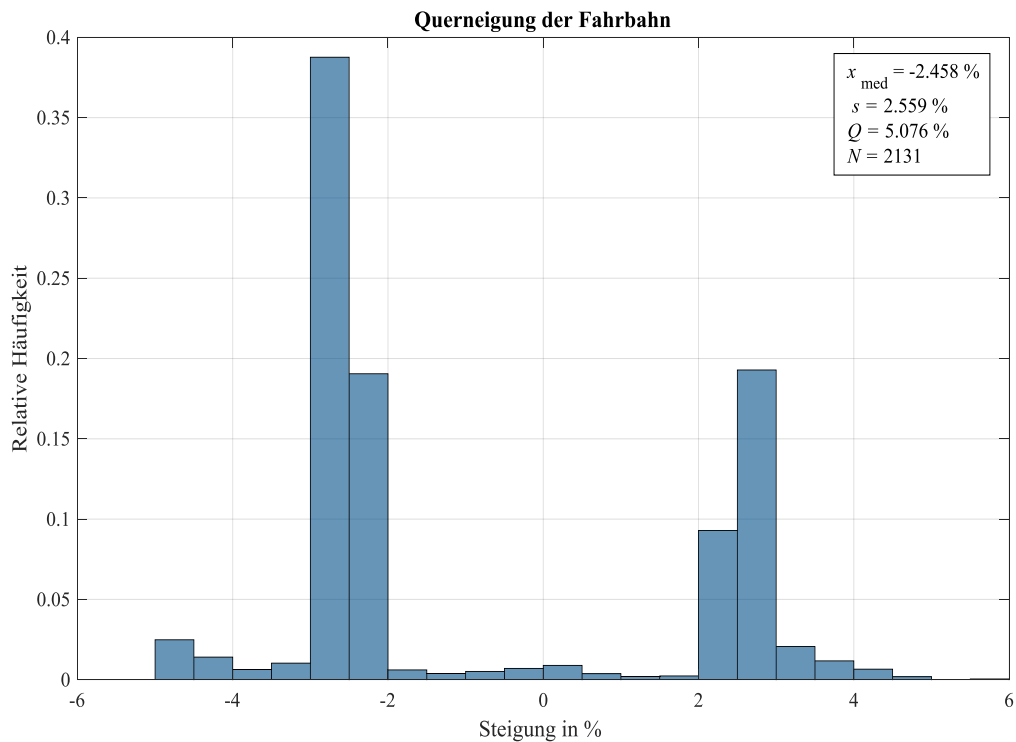


Abbildung A-7: Statistische Auswertung – Querneigung der Fahrbahn

A.2 Analyse der Einflussparameter der beweglichen Objekte

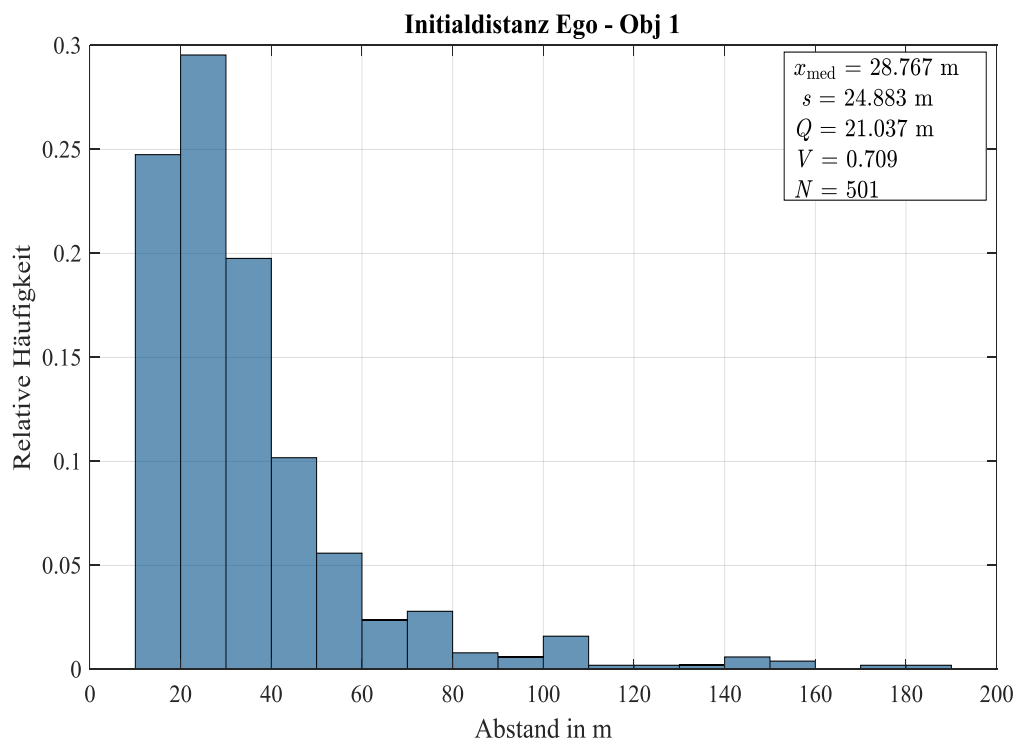


Abbildung A-8: Statistische Auswertung - Initialdistanz Ego-Obj 1 (Funktionales Szenario *Einscherer*)

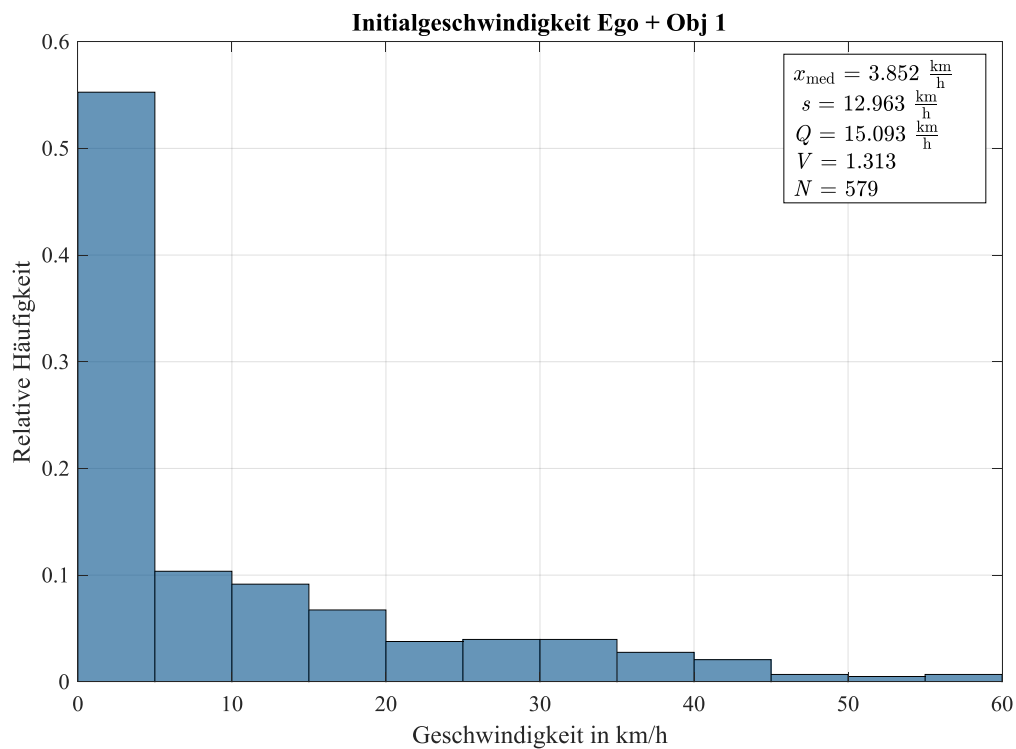


Abbildung A-9: Statistische Auswertung – Initialgeschwindigkeit Ego + Obj 1 (Funktionales Szenario *Einscherer*)

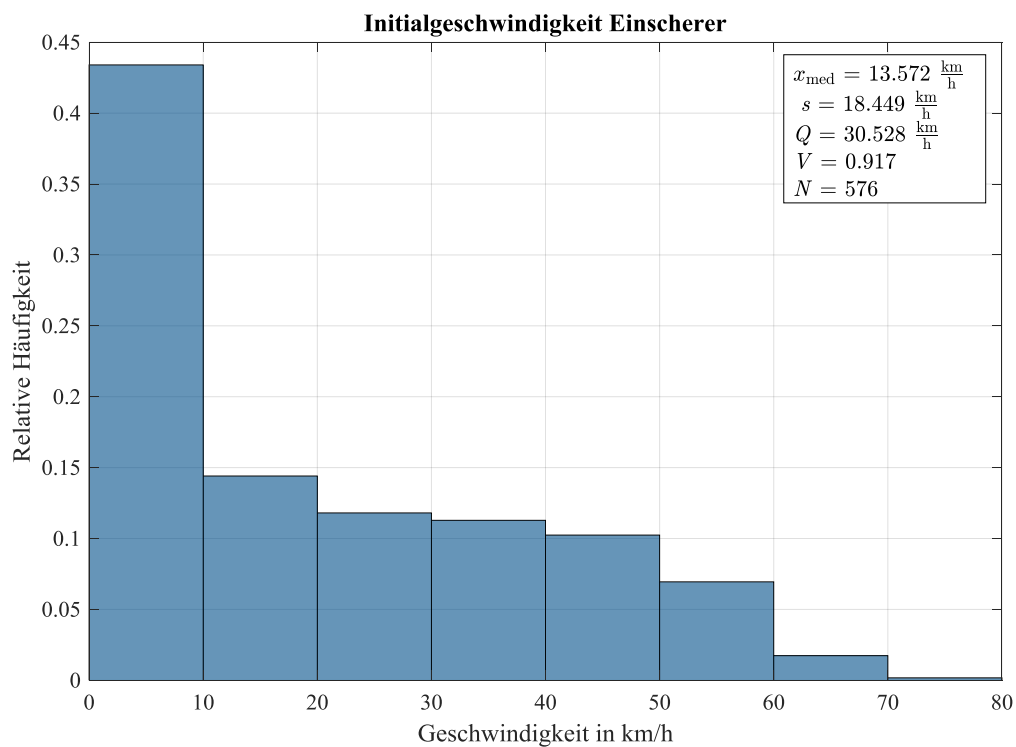


Abbildung A-10: Statistische Auswertung – Initialgeschwindigkeit Einscherer (Funktionales Szenario *Einscherer*)

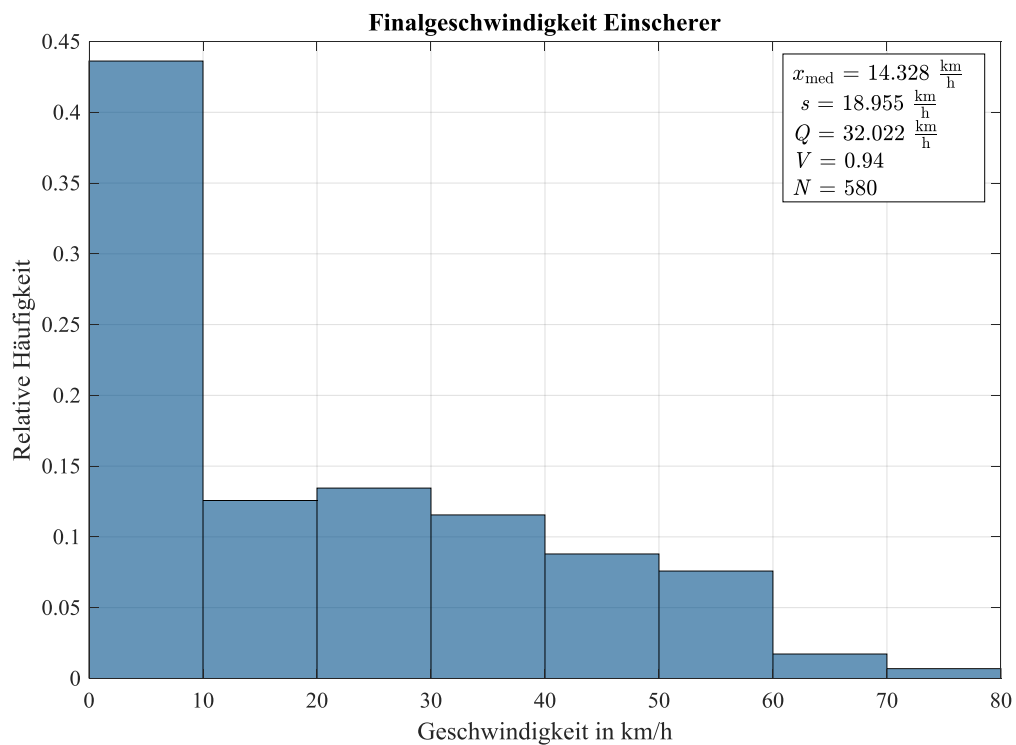


Abbildung A-11: Statistische Auswertung – Finalgeschwindigkeit Einscherer (Funktionales Szenario *Einscherer*)

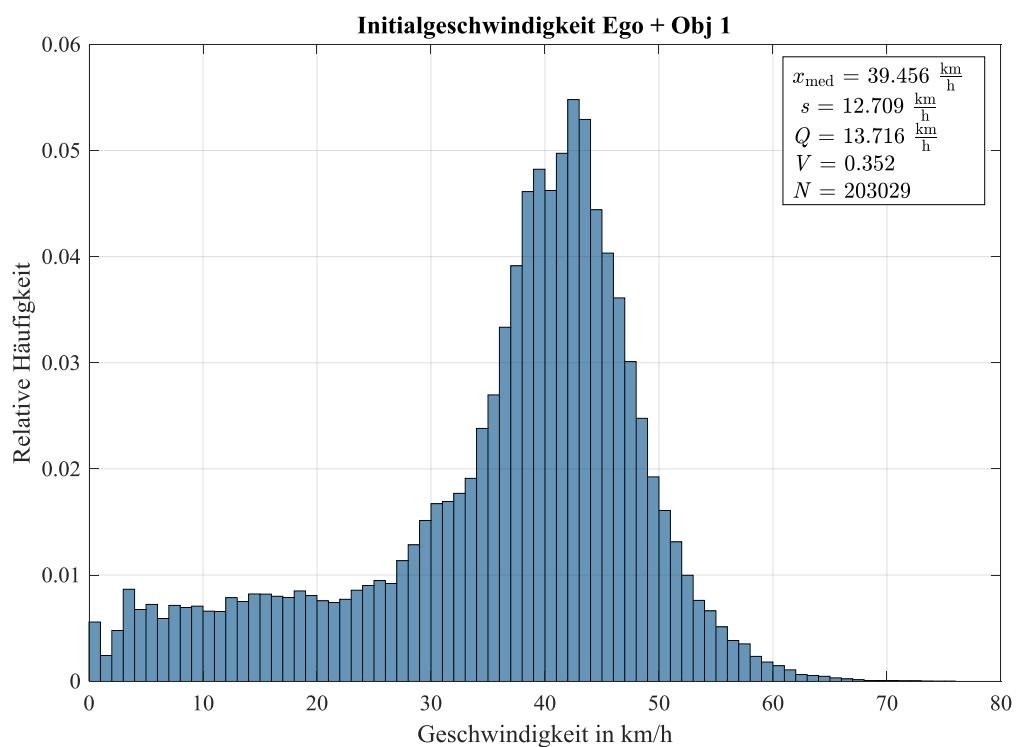


Abbildung A-12: Statistische Auswertung – Initialgeschwindigkeit Ego + Obj 1 (Funktionales Szenario *Stauauflösung*)

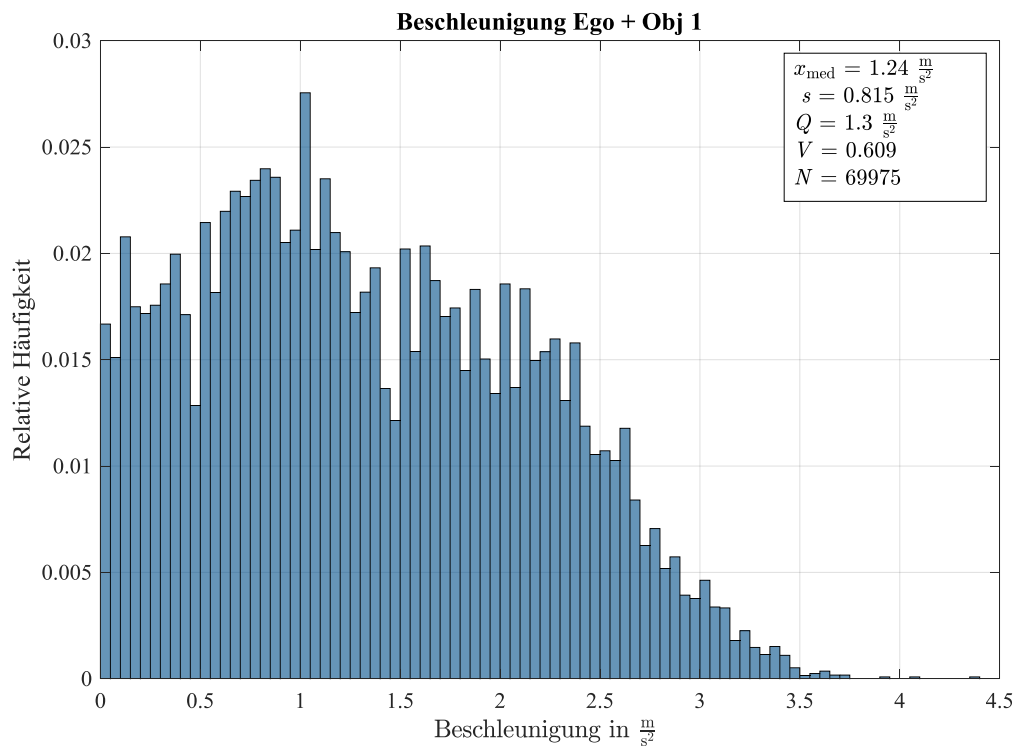


Abbildung A-13: Statistische Auswertung – Beschleunigung Ego + Obj 1 (Funktionales Szenario *Stauauflösung*)

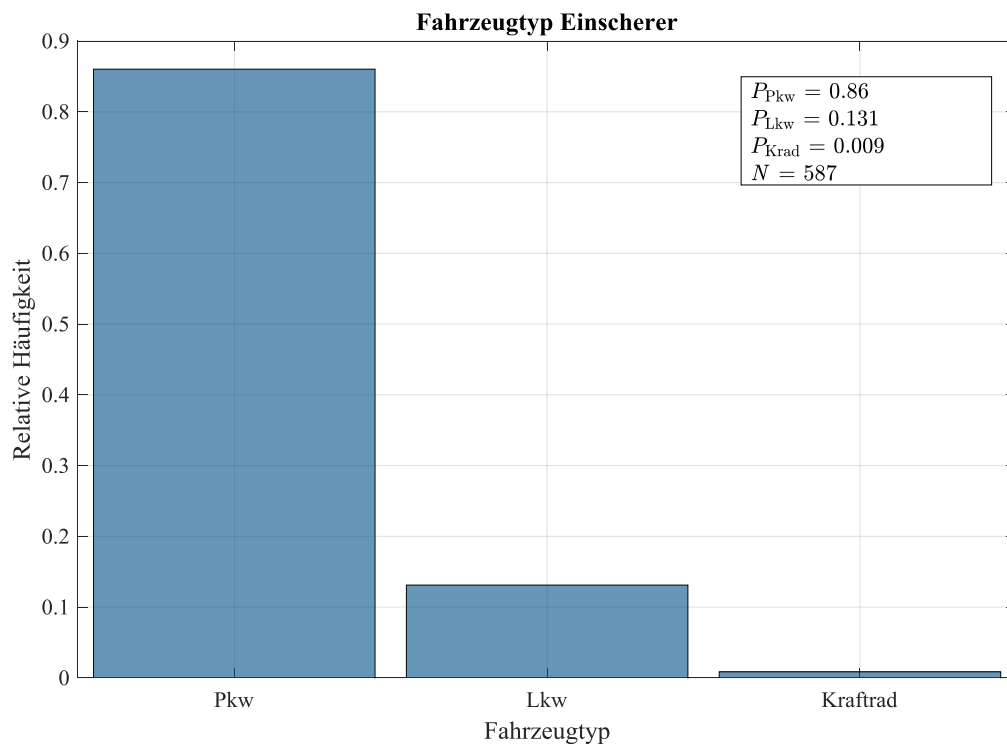


Abbildung A-14: Statistische Auswertung - Fahrzeugtyp Einscherer (Funktionales Szenario *Einscherer*)

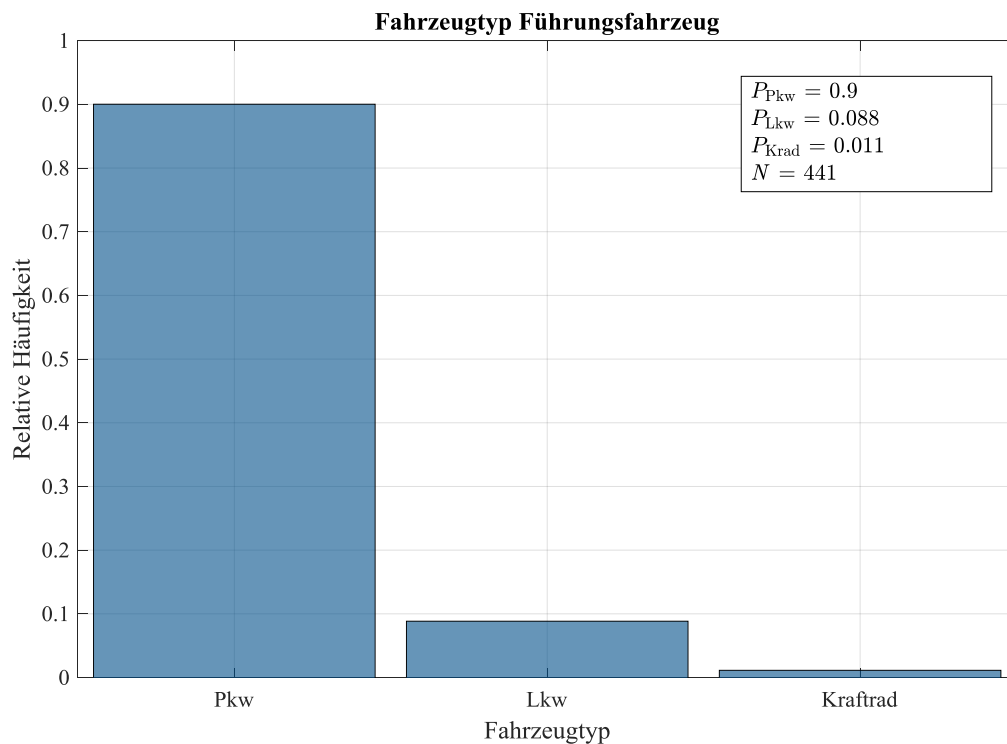


Abbildung A-15: Statistische Auswertung - Fahrzeugtyp Führungsfahrzeug (Funktionales Szenario *Einscherer*)

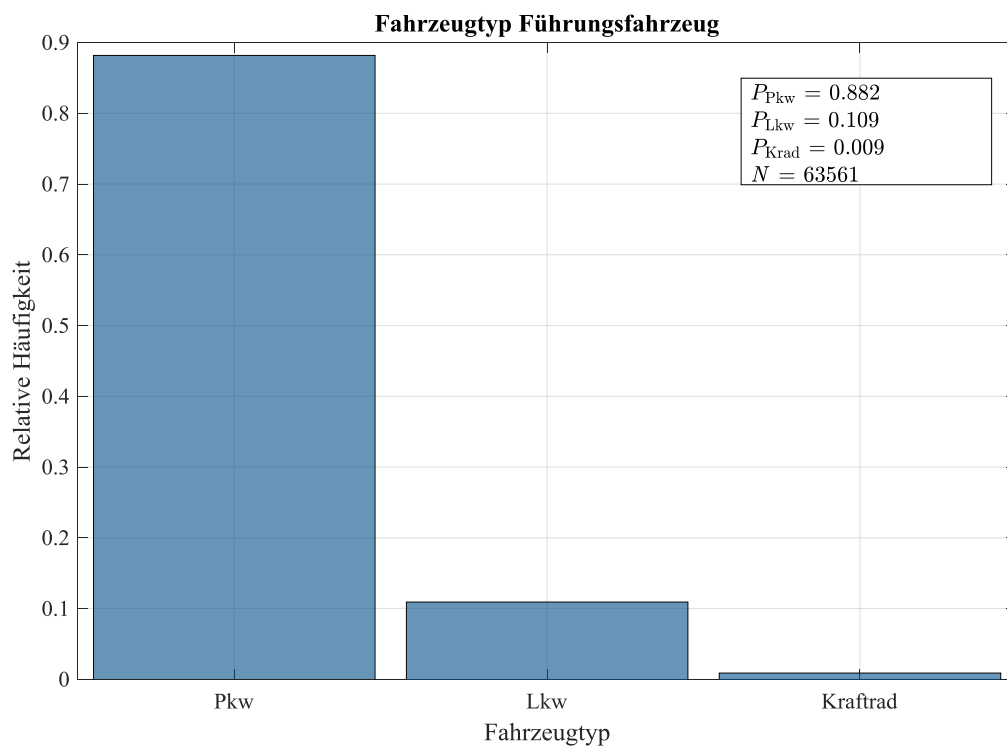


Abbildung A-16: Statistische Auswertung - Fahrzeugtyp Führungsfahrzeug (Funktionales Szenario *Stauauflösung*)

A.3 Übersichtsmatrix der funktionalen Dekomposition

Tabelle A-1: Übersichtsmatrix funktionale Dekomposition & exemplarischer Parameterraum

Ebene	Parameter p_i	Szenario			Einfluss auf funktionale Ebene					
		Ein- scherer	Stauauflö- sung	Äquiv- alenzkl as- senszen ario	0 Infor- mation szugan g	1 Infor- mation sauf- nahme	2 Infor- mation sverar- beitung	3 Situa- tionsve- rständ- nis	4 Verhal- tensent- schei- dung	5 Hand- lung
1 Straßenebene	Breite Fahrstreifen 1	3			x	x			x	
	Breite Fahrstreifen 2	2	-	2	x	x			x	
	Krümmung	100			x	x			x	
	Kraftschlussbeiwert	10			x	x	x	x	x	x
	Längsneigung	10			x	x		x	x	x
	Querneigung	10			x	x		x	x	x
2 Straßenausst- attung	Fahrstreifenmarkierungs- typ links	10			x	x	x	x		
	Fahrstreifenmarkierungs- typ rechts	10			x	x	x	x		
4 Bewegliche Objekte	Fahrzeugtyp Führungsfahrzeug (Obj 1)	3			x	x	x	x		
	Fahrzeugtyp Einscherer (Obj 2)	3	-	3	x	x	x	x		
	Initialgeschwindigkeit Einscherer (Obj 2)	10	-	10		x		x	x	
	Finalgeschwindigkeit Einscherer (Obj 2)	10	-	10	x	x		x	x	
	Initialgeschwindigkeit Ego+Obj 1	10				x		x	x	x
	Initialdistanz Ego – Obj1	20			x	x		x	x	
	Einscherabstand	20	-	20	x	x		x	x	
	Einscherdauer	10	-	10	x	x		x	x	
	Beschleunigung Ego+Obj 1	-	10	10		x		x	x	x
5 Umweltbedi- ngungen	Sonnenposition	250				x	x			
	Niederschlag	10			x	x	x			x
	Bewölkung	5			x	x				
	Wind	20								x
	Temperatur	30				x				x
Größe resultierende r Test Suites für Systemtest	$S_{N,sys.}$	$2 \cdot 10^{22}$	10^{18}	-						
	$S_{10,sys.}$	$6 \cdot 10^{13}$	$3 \cdot 10^{13}$	-						
	$S_{3,sys.}$	$8 \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^5$	-						
Größe resultierende r Test Suites für partikuläres Testen	$S_{N,part.}$	10^{21}	$7 \cdot 10^{16}$	-						
	$S_{10,part.}$	$3 \cdot 10^{13}$	$1.5 \cdot 10^{13}$	-						
	$S_{3,part.}$	$8 \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^5$	-						

A.4 Einflussmatrix

Tabelle A-2: Einflussmatrix des funktionalen Szenarios *Einscherer*

Einfluss von Parameter auf Parameter		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	AS	P
1	Breite Fahrstreifen 1	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	3	0
2	Breite Fahrstreifen 2	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	3	0
3	Krümmung	0	0	x	0	0	2	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	8	8
4	Kraftschlussbeiwert	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	5	15
5	Längsneigung	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	3	3
6	Querneigung	0	0	1	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
7	Fahrstreifenmarkierungstyp links	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	Fahrstreifenmarkierungstyp rechts	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	Fahrzeugtyp Führungsfahrzeug	0	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	Fahrzeugtyp Einscherer	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	3	3
11	Initialgeschwindigkeit Einscherer	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	1	0	0	2	1	0	0	0	0	0	4	4
12	Finalgeschwindigkeit Einscherer	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	Initialgeschwindigkeit Ego + Obj 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	x	1	1	1	0	0	0	0	0	7	7
14	Initialdistanz Ego - Obj 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	x	2	1	0	0	0	0	0	6	6
15	Einscherabstand	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0
16	Einscherdauer	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0
17	Sonnenposition	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	x	0	0	0	0	5	0
18	Niederschlag	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	x	1	0	1	10	10
19	Bewölkung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	x	0	1	2	2
20	Wind	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	x	1	7	7
21	Temperatur	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	x	4	4
PS		0	0	1	3	0	2	0	0	0	0	8	8	6	7	14	14	0	2	2	1	3		
Qx100		-	-	800	167	-	50	-	-	-	-	50	0	117	86	0	0	-	500	100	700	133		

Literaturverzeichnis

Abadie, V.: Autonomous Vehicle (2018)

Abadie, Vincent: Autonomous Vehicle; <http://www.fondation-tuck.fr/upload/docs/application/pdf/2018-04/presentation-abadie.pdf>, 2018, Zugriff 07.08.2019

Altenburg, S. et al.: Einführung von Automatisierungsfunktionen in Pkw-Flotte (2018)

Altenburg, Sven; Kienzler, Hans-Paul; Auf der Maur, Alex: Einführung von Automatisierungsfunktionen in der Pkw-Flotte, 2018

Amersbach, C.; Winner, H.: Functional Decomposition (2017)

Amersbach, Christian; Winner, Hermann: Functional Decomposition, in: 8. Tagung Fahrerassistenz, 2017

Amersbach, C.; Winner, H.: Funktionale Dekomposition (2018)

Amersbach, Christian; Winner, Hermann: Funktionale Dekomposition - Ein Beitrag zur Überwindung der Parameterraumexplosion bei der Validation von höher automatisiertem Fahren, in: 12. Workshop Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren, 2018

Amersbach, C.; Winner, H.: Required and Feasible Test Coverage (2019)

Amersbach, Christian; Winner, Hermann: Defining Required and Feasible Test Coverage for Scenario-Based Validation of Highly Automated Vehicles, in: 22nd IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC) 2019, 2019

Amersbach, C.; Winner, H.: Functional decomposition (2019)

Amersbach, Christian; Winner, Hermann: Functional decomposition-A contribution to overcome the parameter space explosion during validation of highly automated driving, in: Traffic injury prevention sup1, Jahrgang 20, S. 52-57, 2019

Aouini, R.: Masterthesis, Reduktionspotential funktionale Dekomposition (2018)

Aouini, Rachid: Analyse des Potentials zur Reduktion des Freigabeaufwandes für hochautomatisiertes Fahren durch funktionale Dekomposition, Masterthesis, 2018

Arcuri, A.; Briand, L.: Probability of Interaction Fault Detection (2012)

Arcuri, Andrea; Briand, Lionel: Formal Analysis of the Probability of Interaction Fault Detection Using Random Testing, in: IEEE Transactions on Software Engineering (5), Jahrgang 38, S. 1088–1099, 2012

Arnicane, V.: Equivalence class and boundary value testing methods (2009)

Arnicane, Vineta: Complexity of equivalence class and boundary value testing methods, in: International Journal of Computer Science and Information Technology (3), Jahrgang 751, S. 80–101, 2009

ASAM: ASAM OpenCRG

Association for Standardization of Automation and Measuring System: ASAM OpenCRG; <https://www.asam.net/standards/detail/opencrg/>, Zugriff 15.08.2019

ASAM: ASAM OpenDRIVE

Association for Standardization of Automation and Measuring System: ASAM OpenDRIVE; <https://www.asam.net/standards/detail/opendrive/>, Zugriff 15.08.2019

ASAM: ASAM OpenSCENARIO

Association for Standardization of Automation and Measuring System: ASAM OpenSCENARIO; <https://www.asam.net/standards/detail/openscenario/>, Zugriff 15.08.19

ASAM: ASAM Standards

Association for Standardization of Automation and Measuring System: ASAM Standards; <https://www.asam.net/standards/>, Zugriff 15.08.2019

AUDI: Automatisiertes Fahren auf neuem Level (2017)

AUDI: Automatisiertes Fahren auf neuem Level; <https://www.audi-mediacycenter.com/de/pressemitteilungen/automatisiertes-fahren-auf-neuem-level-der-audi-ai-staupilot-9300>, 2017, Zugriff 10.09.2019

AUDI: The traffic jam pilot in the new Audi A8 (2017)

AUDI: The traffic jam pilot in the new Audi A8; <https://www.audi-mediacycenter.com/en/techday-piloted-driving-the-traffic-jam-pilot-in-the-new-audi-a8-9276>, 2017, Zugriff 10.09.2019

Bagschik, G. et al.: Ontology based Scene Creation for the Development of Automated Vehicles

Bagschik, Gerrit; Menzel, Till; Maurer, Markus: Ontology based Scene Creation for the Development of Automated Vehicles, in: 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)

Bagschik, G. et al.: Szenarien für automatisierte Fahrzeuge (2017)

Bagschik, G.; Menzel, T.; Reschka, A.; Maurer, M.: Szenarien für Entwicklung, Absicherung und Test von automatisierten Fahrzeugen, in: 11. Workshop Fahrerassistenzsysteme Uni-DAS e. V., 2017

Bagschik, G. et al.: Wissensbasierte Szenariengenerierung (2018)

Bagschik, Gerrit; Menzel, Tim; Körner, C.; Maurer, Markus: Wissensbasierte Szenariengenerierung für Betriebsszenarien auf deutschen Autobahnen, in: 12. Workshop Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren, 2018

Bartels, A. et al.: Querführungsassistenz (2009)

Bartels, Arne; Rohlf, Michael; Hamel, Sebastian; Saust, Falko; Klauske, Lars C.: Querführungsassistenz, in: Winner, Hermann; Hakuli, Stephan; Wolf, Gabriele (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Praxis, 1. Auflage, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2009

BAST: Automatische Verkehrszählstellen 2016

Bundesanstalt für Straßenwesen: Automatische Verkehrszählstellen 2016; https://www.bast.de/BAST_2017/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/Daten/2016_1/Jawe2016.html, Zugriff 21.08.2019

Behrisch, M. et al.: SUMO - Simulation of Urban MObility

Behrisch, Michael; Bieker, Laura; Erdmann, Jakob; Krajzewicz, Daniel: SUMO - Simulation of Urban MObility, in: Proceedings of SIMUL 2011, The Third International Conference on Advances in System Simulation. ThinkMind. SIMUL 2011

Bickel, J.: Masterthesis, Methode zur Identifikation, Diskretisierung und Zuordnung von Einflussparametern (2019)

Bickel, Julia: Entwicklung einer Methode zur systematischen Identifikation, Diskretisierung und Zuordnung von Einflussparametern für die Validierung hochautomatisierter Fahrfunktionen, Masterthesis, 2019

Block, D. et al.: Simulations on consumer tests (2014)

Block, Delf; Heeren, Sönke; Kühnel, Stefan, et al. (Hrsg.): Simulations on consumer tests: A perspective for driver assistance systems, ACM, 2014

BMJV: StVO (2013)

Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz Straßenverkehrs-Ordnung, 01.04.2013

BMW: PEGASUS Method (2019)

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: PEGASUS Method, 2019

BMW: Scenario Description and Knowledge-based Scenario Generation (2019)

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Scenario Description and Knowledge-based Scenario Generation, 2019

Bourier, G.: Wahrscheinlichkeitsrechnung und schließende Statistik (2013)

Bourier, Günther: Wahrscheinlichkeitsrechnung und schließende Statistik, SPRINGER GABLER, Wiesbaden, 2013

Breuer, J.: Bewertungsverfahren von Fahrerassistenzsystemen (2009)

Breuer, Jörg: Bewertungsverfahren von Fahrerassistenzsystemen, in: Winner, Hermann; Hakuli, Stephan; Wolf, Gabriele (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Praxis, 1. Auflage, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2009

Bröhl, A.-P.: Das V-Modell (1995)

Bröhl, Adolf-Peter (Hrsg.) Das V-Modell, Software - Anwendungsentwicklung - Informationssysteme, 2. Auflage, Oldenbourg, München, Wien, 1995

Cramer, E.; Kramps, U.: Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik (2017)

Cramer, Erhard; Kramps, Udo: Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik, Springer Berlin Heidelberg, 2017

Destatis: Verkehrsunfälle (2018)

Statistisches Bundesamt: Verkehrsunfälle, 2018

DLR: SUMO User Documentation

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt: SUMO User Documentation; https://sumo.dlr.de/wiki/SUMO_User_Documentation, Zugriff 05.09.2019

Donges, E.: Fahrerverhaltensmodelle (2015)

Donges, Edmund: Fahrerverhaltensmodelle, in: Winner, Hermann et al. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2015

Duller, C.: Einführung in die nichtparametrische Statistik (2018)

Duller, Christine (Hrsg.) Einführung in die nichtparametrische Statistik mit SAS, R und SPSS, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2018

DWD: Climate Data Center

Deutscher Wetterdienst: Climate Data Center; <https://cdc.dwd.de/portal/201908021100/searchview>, Zugriff 20.08.19

Eckstein, P. P.: Statistik für Wirtschaftswissenschaftler (2014)

Eckstein, Peter P.: Statistik für Wirtschaftswissenschaftler, 4. Auflage, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2014

Eckstein, P. P.: Statistik für Wirtschaftswissenschaftler (2019)

Eckstein, Peter P.: Statistik für Wirtschaftswissenschaftler, 6. Auflage, SPRINGER GABLER, Wiesbaden, 2019

Eltaher, A.: Diss., Human-Like Test Systems (2013)

Eltaher, Asem: Human-Like Test Systems: A Cognitive-Oriented Approach Applied to Infotainment Devices, Dissertation Technische Universität Braunschweig, Berichte aus der Elektrotechnik, 1. Auflage, Shaker, Herzogenrath, 2013

EU-Kommission: Fahrplan europäischer Verkehrsraum (2011)

Europäische Kommission: Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum, 2011

Feldhütter, A. et al.: Influences on Take-Over Performance (2017)

Feldhütter, Anna; Gold, Christian; Schneider, Sonja; Bengler, Klaus: How the Duration of Automated Driving Influences Take-Over Performance and Gaze Behavior, in: Schlick, Christopher M. et al. (Hrsg.): Advances in Ergonomic Design of Systems, Products and Processes, Springer Berlin Heidelberg; Imprint; Springer, Berlin, Heidelberg, 2017

FGSV: Richtlinien für die Anlage von Autobahnen

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V.: Ausg. 2008, korrigierter Nachdruck: Richtlinien für die Anlage von Autobahnen, FGSV-Verl., Köln

FGSV: Richtlinien für die Markierung von Straßen (1993)

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V.: Richtlinien für die Markierung von Straßen, FGSV-Verl., Köln, 1993

-
- Fleischmann, A.: Diss., Modellbasierte Formalisierung von Anforderungen (2008)**
Fleischmann, Andreas: Modellbasierte Formalisierung von Anforderungen für eingebettete Systeme im Automotive-Bereich, Dissertation Technische Universität München, München, 2008
- Frerichs, D.; Borsdorf, M.: Quality for Vehicle System Simulation (2018)**
Frerichs, Dirk; Borsdorf, Matthias: Quality for Vehicle System Simulation, in: VDI Wissensforum, 2018
- Gao, F. et al.: A test scenario automatic generation strategy (2019)**
Gao, Feng; Duan, Jianli; He, Yingdong; Wang, Zilong: A test scenario automatic generation strategy for intelligent driving systems, in: Mathematical Problems in Engineering, Jahrgang 2019, 2019
- Garousi, V. et al.: Testing embedded software (2018)**
Garousi, Vahid; Felderer, Michael; Karapıçak, Çağrı M.; Yılmaz, Uğur: Testing embedded software: A survey of the literature, in: Information and Software Technology, Jahrgang 104, S. 14–45, 2018
- Gasser, T. M.: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung (2012)**
Gasser, Tom M.: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung, Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen : F, Fahrzeugtechnik, Jahrgang 83, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, 2012
- Gasser, T. M. et al.: Rahmenbedingungen für die Fahrerassistenzsystementwicklung (2015)**
Gasser, Tom M.; Seeck, Andre; Smith Walker, Bryant: Rahmenbedingungen für die Fahrerassistenzsystementwicklung, in: Winner, Hermann et al. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2015
- Graab, B. et al.: Analyse von Verkehrsunfällen**
Graab, Birgit; Donner, Eckart; Chiellino, Ulrich; Hoppe, Maria: Analyse von Verkehrsunfällen hinsichtlich unterschiedlicher Fahrerpopulationen und daraus ableitbarer Ergebnisse für die Entwicklung adaptiver Fahrerassistenzsysteme, in: TU München & TÜV Süd Akademie GmbH (Eds.), Conference: Active Safety Through Driver Assistance. München, 2008.
- Grindal, M. et al.: Combination testing strategies (2005)**
Grindal, Mats; Offutt, Jeff; Andler, Sten F.: Combination testing strategies: a survey, in: Software Testing, Verification and Reliability (3), Jahrgang 15, S. 167–199, 2005
- Grochtmann, M.; Grimm, K.: Classification trees for partition testing (1993)**
Grochtmann, Matthias; Grimm, Klaus: Classification trees for partition testing, in: Software Testing, Verification and Reliability (2), Jahrgang 3, S. 63–82, 1993
- Gründl, M.: Diss., Fehler und Fehlverhalten als Ursache von Verkehrsunfällen (2005)**
Gründl, Martin: Fehler und Fehlverhalten als Ursache von Verkehrsunfällen und Konsequenzen für das Unfallvermeidungspotenzial und die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen, Dissertation Universität Regensburg, 2005
- Grüner, S. et al.: Systemsicherheit (2013)**
Grüner, Stefan; Gaedke, Alexander; Heger, Markus; Sprinzl, Michael; Vähning, Alexander: Elektromechanische Lenksysteme (EPS), in: Pfeffer, Peter; Harrer, Manfred (Hrsg.): Lenkungshandbuch, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2013
- Hakuli, S.; Krug, M.: Virtuelle Integration (2015)**
Hakuli, Stephan; Krug, Markus: Virtuelle Integration, in: Winner, Hermann et al. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2015
- Hallerbach, S. et al.: Simulation-Based Identification of Critical Scenarios (2018)**
Hallerbach, Sven; Xia, Yiqun; Eberle, Ulrich; Koester, Frank: Simulation-Based Identification of Critical Scenarios for Cooperative and Automated Vehicles, in: SAE International Journal of Connected and Automated Vehicles (2), Jahrgang 1, 2018
- Heinrichs, D.: Autonomes Fahren und Stadtstruktur (2015)**
Heinrichs, Dirk: Autonomes Fahren und Stadtstruktur, in: Maurer, Markus et al. (Hrsg.): Autonomes Fahren, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2015

Höhn, R.; Höppner, S.: Das V-Modell XT (2008)

Höhn, Reinhard; Höppner, Stephan: Das V-Modell XT, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008

Hüsemann, T.: Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn (2007)

Hüsemann, Thomas: Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn, in: Heißing, Bernd; Ersoy, Metin (Hrsg.): Fahrwerkhandbuch, ATZ/MTZ-Fachbuch, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, Wiesbaden, 2007

ISO: 26262 - Road vehicles - Functional safety - (2011)

International Organization for Standardization: 1:2011: 26262 - Road vehicles - Functional safety -, 2011

ISO: 26262 - Road vehicles - Functional safety - (2018)

International Organization for Standardization: 2:2018: 26262 - Road vehicles - Functional safety -, 2018

ISO: 21448:2019 Road Vehicles -- Safety of the intended functionality (2019)

International Organization for Standardization: 21448:2019 Road Vehicles -- Safety of the intended functionality, 2019

ITA: Dekomposition (2009)

Institut für Technologie und Arbeit: Dekomposition; <https://www.optimus-spitzencluster.de/pdf/dekomposition.pdf>, 2009, Zugriff 03.08.2019

Junietz, P. et al.: Metrik zur Bewertung der Kritikalität

Junietz, Phillip; Schneider, Jan; Winner, Hermann: Metrik zur Bewertung der Kritikalität von Verkehrssituationen und -szenarien, in: 11. Workshop Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren

Junietz, P. et al.: Approaches to Address Safety Validation (2018)

Junietz, Philipp; Wachenfeld, Walther; Klonecki, Kamil; Winner, Hermann: Evaluation of Different Approaches to Address Safety Validation of Automated Driving, in: 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems, S. 491–496, 2018

Kacker, R. N. et al.: Combinatorial testing for software (2013)

Kacker, Raghu N.; Richard Kuhn, Richard D.; Lei, Yu; Lawrence, James F.: Combinatorial testing for software: An adaptation of design of experiments, in: Measurement (9), Jahrgang 46, S. 3745–3752, 2013

Klempau, F.: Diss., Reibwertvorhersagesystem im fahrenden Fahrzeug (2003)

Klempau, Frank: Untersuchungen zum Aufbau eines Reibwertvorhersagesystems im fahrenden Fahrzeug, Dissertation TU Darmstadt, 2003

Kohn, W.; Öztürk, R.: Statistik für Ökonomen (2017)

Kohn, Wolfgang; Öztürk, Riza: Statistik für Ökonomen, Springer-Lehrbuch, 3. Auflage, SPRINGER GABLER, Berlin, Heidelberg, 2017

Krajewski, R. et al.: The highD Dataset (2018)

Krajewski, Robert; Bock, Julian; Kloeker, Laurent; Eckstein, Lutz: The highd dataset: A drone dataset of naturalistic vehicle trajectories on german highways for validation of highly automated driving systems, in: 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2018

Krannich, K.-D.: Zerlegungsstrategien (1997)

Krannich, Klaus-Dieter: Zerlegungsstrategien; <https://www.math.tu-cottbus.de/~kd/parallel/vorl/vorl/node19.html>, 1997, Zugriff 03.08.2019

Krauß, S.: Diss., Microscopic Modeling of Traffic Flow (1998)

Krauß, Stefan: Microscopic Modeling of Traffic Flow, Dissertation Universität zu Köln, 1998

Kruse, P. M.: A Highly Configurable Test System (2009)

Kruse, Peter M.: A Highly Configurable Test System for Evolutionary Black-box Testing of Embedded Systems, in: 11th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation, S. 1545–1552, 2009

Kuhn, D. R. et al.: Software fault interactions (2004)

Kuhn, D. R.; Wallace, Dolores R.; Gallo, Albert M.: Software fault interactions and implications for software testing, in: IEEE Transactions on Software Engineering (6), Jahrgang 30, S. 418–421, 2004

Liggesmeyer, P.: Software-Qualität (2009)

Liggesmeyer, Peter: Software-Qualität: Testen, Analysieren und Verifizieren von Software, Springer Science & Business Media, 2009

Lindlar, F.: Diss., Modellbasierter evolutionärer Funktionstest (2012)

Lindlar, Felix: Modellbasierter evolutionärer Funktionstest, Dissertation Technische Universität Berlin, 2012

Lotz, F.: Diss., Referenzarchitektur für die automatisierte Fahrzeugführung (2017)

Lotz, Felix: Eine Referenzarchitektur für die assistierte und automatisierte Fahrzeugführung mit Fahrereinbindung, Dissertation TU Darmstadt, 2017

Mathworks: MATLAB Dokumentation

Mathworks: MATLAB Dokumentation; <https://www.mathworks.com/help/stats/boxplot.html>, Zugriff 11.09.2019

Maurer, M.: Entwurf und Test von Fahrerassistenzsystemen (2009)

Maurer, Markus: Entwurf und Test von Fahrerassistenzsystemen, in: Winner, Hermann; Hakuli, Stephan; Wolf, Gabriele (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Praxis, 1. Auflage, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2009

Maurer, M. et al.: Autonomes Fahren (2015)

Maurer, Markus; Gerdes, J. C.; Lenz, Barbara; Winner, Hermann (Hrsg.) Autonomes Fahren, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2015

Maurer, M.: Einleitung (2015)

Maurer, M.: Einleitung, in: Maurer, Markus et al. (Hrsg.): Autonomes Fahren, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2015

Menzel, T. et al.: Scenarios for Automated Vehicles (2018)

Menzel, Till; Bagschik, Gerrit; Maurer, Markus: Scenarios for Development, Test and Validation of Automated Vehicles, in: IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2018

Mintsis, E.: Modelling automated vehicles behaviour in mixed traffic (2018)

Mintsis, Evangelos: Modelling, simulation and assessment of vehicle automations and automated vehicles driver behaviour in mixed traffic, in: Transition Areas for Infrastructure-Assisted Driving, 2018

Müller-Gronbach, T. et al.: Monte Carlo-Algorithmen (2012)

Müller-Gronbach, Thomas; Novak, Erich; Ritter, Klaus: Monte Carlo-Algorithmen, Springer-Lehrbuch, Springer, Berlin, 2012

Neubert, L.: Diss., Statistische Analyse von Verkehrsdaten (2000)

Neubert, Lutz: Statistische Analyse von Verkehrsdaten und die Modellierung von Verkehrsfluss mittels zellulärer Automaten, Dissertation Gerhard-Mercator-Universität Duisburg, 2000

NHTSA: Examination of Naturalistic Lane-Changes (2004)

National Highway Traffic Safety Administration: A Comprehensive Examination of Naturalistic Lane-Changes, Washington, 2004

NHTSA: Federal Automated Vehicles Policy (2016)

National Highway Traffic Safety Administration: Federal Automated Vehicles Policy, 2016

Nie, C.; Leung, H.: A survey of combinatorial testing (2011)

Nie, Changhai; Leung, Hareton: A survey of combinatorial testing, in: (ACM Computing Surveys) (2), Jahrgang 43, S. 1–29, 2011

OpenStreetMap OpenStreetMap; <https://www.openstreetmap.de/>, Zugriff 24.07.2019

PEGASUS: The PEGASUS Method

PEGASUS: The PEGASUS Method; <https://www.pegasusprojekt.de/en/pegasus-method>, Zugriff 19.08.2019

Pfeffer, P.: Ausblick - Zukunft der Lenkung im Automobil (2013)

Pfeffer, Peter: Ausblick - Zukunft der Lenkung im Automobil, in: Pfeffer, Peter; Harrer, Manfred (Hrsg.): Lenkungsbandbuch, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2013

Pfeffer, P.; Harrer, M.: Lenkungsbandbuch (2013)

Pfeffer, Peter; Harrer, Manfred (Hrsg.) Lenkungsbandbuch, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2013

Prialé Olivares, S. et al.: Virtual Stochastic Testing (2016)

Prialé Olivares, Stephanie; Rebernik, Nikolaus; Eichberger, Arno; Stadlober, Ernst: Virtual Stochastic Testing of Advanced Driver Assistance Systems, in: Schulze, Tim; Müller, Beate; Meyer, Gereon (Hrsg.): Advanced Microsystems for Automotive Applications 2015, Springer International Publishing, Cham, 2016

PSA: Funktionsbeschreibung Traffic Jam Chauffeur

Peugeot Société Anonyme: Funktionsbeschreibung Traffic Jam Chauffeur; <https://www.groupe-psa.com/en/newsroom/automotive-innovation/traffic-jam-chauffeur/>, Zugriff 07.08.2019

Puetz, A. et al.: Database of relevant traffic scenarios (2017)

Puetz, A.; Zlocki, A.; Bock, J.; Eckstein, L.: System validation of highly automated vehicles with a database of relevant traffic scenarios, in: 12th ITS European Congress, 2017

Rasmussen, J.: Skills, Rules and Knowledge (1983)

Rasmussen, Jens: Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models, in: IEEE transactions on systems, man, and cybernetics 3, 1983

Reason, J.: The contribution of latent human failures (1990)

Reason, James: The contribution of latent human failures to the breakdown of complex systems, in: Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences (1241), Jahrgang 327, S. 475–484, 1990

Reschka, A.: Diss., Fertigkeiten-und Fähigkeitengraphen (2017)

Reschka, Andreas: Fertigkeiten-und Fähigkeitengraphen als Grundlage des sicheren Betriebs von automatisierten Fahrzeugen im öffentlichen Straßenverkehr in städtischer Umgebung, Dissertation Technische Universität Braunschweig, 2017

Robinson-Mallett, I. C. et al.: Integration und Validation von Produktlinien für FAS (2010)

Robinson-Mallett, Ing C.; Heers, H.; Wegener, J.: Integration und Validation von Produktlinien für Fahrerassistenzsysteme im Kontext der ISO 26262, in: 26. VDI/VW-Gemeinschaftstagung - Fahrerassistenz und Integrierte Sicherheit, S. 407–423, 2010

Runkler, T. A.: Data Mining (2015)

Runkler, Thomas A.: Data Mining, Computational Intelligence, 2. Auflage, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015

SAE International: SAE J3016 (2018)

SAE International: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles, 2018

Saltelli, A. et al.: A Quantitative Model-Independent Method for Global Sensitivity Analysis of Model Output (1999)

Saltelli, A.; Tarantola S.; Chan. K.P.-S.: A Quantitative Model-Independent Method for Global Sensitivity Analysis of Model Output, in: Technometrics (41), S. 39–56, 1999

Saltelli, A.: Sensitivity analysis of scientific models (2007)

Saltelli, A.: Sensitivity analysis of scientific models, Wiley; John Wiley, Hoboken, N.J., Chichester, 2007

Schnieder, L.; Hosse, R.: Leitfaden SOTIF (2019)

Schnieder, Lars; Hosse, René: Leitfaden Safety of the Intended Functionality, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019

Schramm, D. et al.: Modellbildung von Kraftfahrzeugen (2018)

Schramm, Dieter; Hiller, Manfred; Bardini, Roberto: Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2018

Schuldt, F.: Diss., Methodischer Test automatisierter Fahrunktionen (2017)

Schuldt, Fabian: Ein Beitrag für den methodischen Test von automatisierten Fahrfunktionen mit Hilfe von virtuellen Umgebungen, Dissertation Technische Universität Braunschweig, 2017

Seiffert, U.; Rainer, G.: Virtuelle Produktentstehung im Kfz (2008)

Seiffert, Ulrich; Rainer, Gotthard: Virtuelle Produktentstehung für Fahrzeug und Antrieb im Kfz, Vieweg + Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden, 2008

Siebertz, K. et al.: Statistische Versuchsplanung (2017)

Siebertz, Karl; van Bebber, David; Hochkirchen, Thomas: Statistische Versuchsplanung, VDI-Buch, 2. Auflage, Springer Vieweg, Berlin, Germany, 2017

Sommerville, I.: Software engineering (2011)

Sommerville, Ian: Software engineering, Addison-wesley, 2011

Tölle, W.: Ein Fahrmanöverkonzept für einen maschinellen Kopiloten (1996)

Tölle, Winfried: Ein Fahrmanöverkonzept für einen maschinellen Kopiloten, in: FORTSCHRITT BERICHTE-VDI REIHE 12 VERKEHRSTECHNIK FAHRZEUGTECHNIK, 1996

Toutenburg, H.; Knöfel, P.: Six Sigma (2007)

Toutenburg, Helge; Knöfel, Philipp: Six Sigma, Springer Berlin Heidelberg, 2007

Ulbrich, S. et al.: Defining Scene, Situation and Scenario (2015)

Ulbrich, Simon; Menzel, Tim; Reschka, Andreas; Schuldt, Fabian; Maurer, Markus: Defining and Substantiating the Terms Scene, Situation, and Scenario for Automated Driving, in: 2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems, S. 982–988, 2015

Ulbrich, S. et al.: Definition Szene, Situation und Szenario (2015)

Ulbrich, Simon; Menzel, T.; Reschka, A.; Schuldt, Fabian; Maurer, Markus: Definition der Begriffe Szene, Situation und Szenario für das automatisierte Fahren, in: 10. Workshop Fahrerassistenzsysteme FAS, 2015

VDI: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme (2004)

Verein Deutscher Ingenieure: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme, 2004

Vester, F.: Die Kunst, vernetzt zu denken (2001)

Vester, Frederic: Die Kunst, vernetzt zu denken, 7. Auflage, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 2001

Viehof, M.: Diss., Objektive Qualitätsbewertung von Fahrdynamiksimulationen (2018)

Viehof, Michael: Objektive Qualitätsbewertung von Fahrdynamiksimulationen durch statistische Validierung, Dissertation Technische Universität Darmstadt, 2018

VIRES Simulationstechnologie GmbH: OpenDRIVE

VIRES Simulationstechnologie GmbH: OpenDRIVE; <http://www.opendrive.org/project.html>, Zugriff 15.08.2019

VIRES Simulationstechnologie GmbH: OpenSCENARIO Formatspezifikation v0.9.1 (2017)

VIRES Simulationstechnologie GmbH: OpenSCENARIO Formatspezifikation v0.9.1; <http://www.openscenario.org/download.html>, 2017, Zugriff 20.08.19

VIRES Simulationstechnologie GmbH: OpenDRIVE Format Specification (2019)

VIRES Simulationstechnologie GmbH: OpenDRIVE Format Specification, Rev. 1.5, 2019

Wachenfeld, W.; Winner, H.: Die Freigabe des autonomen Fahrens (2015)

Wachenfeld, Walther; Winner, Hermann: Die Freigabe des autonomen Fahrens, in: Maurer, Markus et al. (Hrsg.): Autonomes Fahren, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2015

Winner, H.: Tire

Winner, Hermann: Tire, Fahrdynamik und Fahrkomfort WS 2017/2018

Winner, H. et al.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme (2009)

Winner, Hermann; Hakuli, Stephan; Wolf, Gabriele (Hrsg.) Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Praxis, 1. Auflage, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2009

Winner, H. et al.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme (2015)

Winner, Hermann; Hakuli, Stephan; Lotz, Felix; Singer, Christina (Hrsg.) Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2015

Winner, H.: Quo vadis, FAS? (2015)

Winner, Hermann: Quo vadis, FAS?, in: Winner, Hermann et al. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2015

Winner, H. et al.: Safety Assurance for Highly Automated Driving (2016)

Winner, Hermann; Wachenfeld, Walther; Junietz, Philipp: Safety Assurance for Highly Automated Driving - The PEGASUS Approach, Automated Vehicle Symposium San Francisco, 2016

Winner, H.: Leitfaden zu Dissertation und Entwicklungsberichten (2018)

Winner, Hermann: Leitfaden zu Dissertation und Entwicklungsberichten, 2018

Wohlrab, S.: Masterthesis, Einflussanalyse von Parametervariationen am Fahrzeug (2016)

Wohlrab, Sebastian: Einflussanalyse von Parametervariationen am Fahrzeug auf die Fahrdynamik und die charakteristischen Kennwerte in standardisierten Fahrmanövern, Masterthesis, 2016

Z. Huang et al.: Evaluation of automated vehicles (2017)

Z. Huang; D. Zhao; H. Lam; D. J. LeBlanc; H. Peng: Evaluation of automated vehicles in the frontal cut-in scenario, in: 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2017

Zhao, Y.-Q. et al.: Estimation of Road Friction Coefficient (2017)

Zhao, You-Qun; Li, Hai-Qing; Lin, Fen; Wang, Jian; Ji, Xue-Wu: Estimation of Road Friction Coefficient in Different Road Conditions Based on Vehicle Braking Dynamics, in: Chinese Journal of Mechanical Engineering (4), Jahrgang 30, S. 982–990, 2017